

SÉRIE A, N° 707.

N° D'ORDRE :

1468.

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

**Joseph REY,**

Lieutenant de Vaisseau.

---

1<sup>re</sup> THÈSE. — SUR L'IONISATION DE L'AIR PAR LES CHUTES D'EAU.

2<sup>e</sup> THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

---

Soutenues le 1<sup>er</sup> juin 1912, devant la Commission d'Examen.

MM. P. JANET,      *Président.*  
G. URBAIN,      *Examinateurs.*  
J. PERRIN,      }

---

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,  
Quai des Grands-Augustins, 55.

1912





11

11

SÉRIE A, N° 707.  
N° D'ORDRE :  
1468.

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

**Joseph REY,**

Lieutenant de Vaisseau.

1<sup>re</sup> THÈSE. — SUR L'IONISATION DE L'AIR PAR LES CHUTES D'EAU.

2<sup>e</sup> THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le <sup>5</sup>/juin 1912, devant la Commission d'Examen.

MM. P. JANET, *Président.*

G. URBAIN, } *Examineurs.*  
J. PERRIN, }



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,  
Quai des Grands-Augustins, 55.

1912

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS.

|                           |                               |                                                   |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|
|                           | MM.                           |                                                   |
| Doyen.....                | P. APPELL, Professeur ..      | Mécanique rationnelle.                            |
| Doyen honoraire.....      | G. DARBOUX.....               | Géométrie supérieure.                             |
| Professeurs honoraires. { | CH. WOLF.                     |                                                   |
|                           | J. RIBAN.                     |                                                   |
|                           | LIPPMANN.....                 | Physique.                                         |
|                           | BOUTY.....                    | Physique.                                         |
|                           | BOUSSINESQ.....               | Physique mathématique et Calcul des probabilités. |
|                           | PICARD.....                   | Analyse supérieure et Algèbre sup.                |
|                           | H. POINCARÉ.....              | Astronomie mathématique et Mécanique céleste.     |
|                           | Y. DELAGE.....                | Zoologie, Anatomie, Physiol. compar.              |
|                           | Gaston BONNIER.....           | Botanique.                                        |
|                           | DASTRE.....                   | Physiologie.                                      |
|                           | KÖENIGS.....                  | Mécanique phys. et expérimentale.                 |
|                           | VELAIN.....                   | Géographie physique.                              |
|                           | GOURSAT.....                  | Calcul différentiel et Calcul intégral.           |
|                           | CHATIN.....                   | Histologie.                                       |
|                           | HALLER.....                   | Chimie organique.                                 |
|                           | JOANNIS.....                  | Chimie (Enseignement P. C. N.).                   |
|                           | JANET.....                    | Physique (Enseignement P. C. N.).                 |
| Professeurs.....          | WALLERANT.....                | Minéralogie.                                      |
|                           | ANDOYER.....                  | Astronomie physique.                              |
|                           | PAINLEVÉ.....                 | Mathématiques générales.                          |
|                           | HAUG.....                     | Géologie.                                         |
|                           | HOUSSAY.....                  | Zoologie.                                         |
|                           | H. LE CHATELIER.....          | Chimie.                                           |
|                           | Gabriel BERTRAND.....         | Chimie biologique.                                |
|                           | M <sup>me</sup> P. CURIE..... | Physique générale.                                |
|                           | CAULLERY.....                 | Zool. (Évolution des êtres organisés).            |
|                           | C. CHABRIÉ.....               | Chimie appliquée.                                 |
|                           | G. URBAIN.....                | Chimie.                                           |
|                           | Émile BOREL.....              | Théorie des fonctions.                            |
|                           | MARCHIS.....                  | Aviation.                                         |
|                           | Jean PERRIN.....              | Chimie physique.                                  |
|                           | G. PRUVOT.....                | Zoologie, Anatomie, Physiol. comp.                |
|                           | MATRUCHOT.....                | Botanique.                                        |
|                           | H. ABRAHAM.....               | Physique.                                         |
|                           | N.....                        | Applicat. de l'Analyse à la Géométrie.            |
|                           | N.....                        | Calcul différentiel et Calcul intégral.           |
|                           | PUISEUX.....                  | Mécanique et Astronomie.                          |
|                           | LEDUC.....                    | Physique.                                         |
|                           | MICHEL.....                   | Minéralogie.                                      |
|                           | HEROUARD.....                 | Zoologie.                                         |
|                           | Léon BERTRAND.....            | Géologie.                                         |
| Professeurs adjoints ...  | Rémy PERRIER.....             | Zoologie (Enseignement P. C. N.).                 |
|                           | MOLLIARD.....                 | Physiologie végétale.                             |
|                           | COTTON.....                   | Physique.                                         |
|                           | LESPIEAU.....                 | Chimie.                                           |
|                           | GENTIL.....                   | Pétrographie.                                     |
|                           | SAGNAC.....                   | Physique (Enseignement P. C. N.).                 |
|                           | PÉREZ.....                    | Zoologie (Évolution des êtres organisés).         |
| Secrétaire.....           | D. TOMBECK.                   |                                                   |

A

**MA FEMME.**



A

MONSIEUR P. LANGEVIN,

PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE.



Digitized by the Internet Archive  
in 2026

[https://archive.org/details/IA41549928\\_0047](https://archive.org/details/IA41549928_0047)

---

# PREMIÈRE THÈSE.

---

SUR

## L'IONISATION DE L'AIR

PAR LES CHUTES D'EAU.

---

### INTRODUCTION.

Les découvertes récentes dans l'atmosphère d'ions analogues à ceux que fournissent les rayons de Röntgen, de centres chargés de mobilité un millier de fois moindre, et enfin de rayonnements radioactifs, ont donné aux recherches sur l'Électricité atmosphérique une impulsion puissante; et il semble permis d'espérer une réponse positive à la question de l'origine du champ terrestre.

Toutefois les données expérimentales capables d'étayer par des chiffres une théorie viable sont encore peu nombreuses : M. A.-B. Chauveau pouvait justement écrire dans un travail tout récent : « La question du nombre (des ions de différentes sortes existant normalement dans l'atmosphère) reste à trancher..., question fondamentale au point de vue météorologique, et presque irritante, dans son état actuel, par les contradictions et les incertitudes des résultats connus. »

Avant d'abandonner les théories anciennes auxquelles s'attachent des noms de physiciens illustres, il nous a paru utile de soumettre ces théories aux contrôles d'expé-

rimentation suggérés par l'étude corpusculaire des charges électriques.

Parmi ces théories très nombreuses, nous avons choisi celles qui font intervenir les précipitations de pluie, la houle des mers, et enfin l'évaporation, facteurs des plus importants dans la Physique du Globe.

Entraîné par notre sujet dans le domaine physico-chimique, nous avons donné à l'étude du phénomène d'électrisation par les chutes d'eau un développement relatif assez considérable pour justifier le titre du présent Mémoire.

## HISTORIQUE.

1. L'histoire de l'ionisation de l'air par les chutes d'eau ne saurait être strictement limitée au relevé des phénomènes d'électrisation observés au voisinage des cascades naturelles ou artificielles. La connaissance de ces derniers a en effet progressé grâce à l'étude de phénomènes analogues; et des liens ont été cherchés ou découverts entre l'électricité des cascades, de la pluie, du barbotage, de la pulvérisation, des phénomènes chimiques, etc. Toutefois, afin d'éviter des longueurs, nous nous bornerons, en ce qui concerne les questions liées au sujet de notre Mémoire, à indiquer les faits ou les idées qui ont pu inspirer des expériences ou des théories applicables aux chutes d'eau elles-mêmes.

### PREMIÈRE PÉRIODE.

#### *Faits les plus anciens.*

2. En 1675, Picard, en transportant un baromètre, remarque une lueur dans la chambre à vide. Sébastien et Cassini observent le même phénomène.

Le célèbre mathématicien Jean Bernoulli construit une *lampe à phosphore mercuriel*, en fait hommage à Fré-

déric I<sup>er</sup>, reçoit en récompense une médaille en or, et remercie par un poème.

En 1705, Hauksbee <sup>(1)</sup> démontre, à la Société Royale de Londres, que l'écrasement d'un jet de mercure contre un obstacle solide, dans le vide, engendre un phénomène lumineux, dû au frottement du mercure contre le verre dans l'air raréfié.

⚡ Telles sont les premières expériences dans lesquelles l'agitation d'un liquide, son frottement ou sa chute, manifeste une électrisation.

Nollet <sup>(2)</sup> regarde comme la source de l'électricité atmosphérique le frottement des vapeurs nuageuses contre l'air.

Nous retrouverons dans l'étude de Faraday sur la machine hydro-électrique les idées de Hauksbee et de Nollet, précisées.

3. Au cours même de ses voyages dans les Alpes, de Saussure <sup>(3)</sup>, s'efforce d'interpréter par l'expérience les observations qu'il recueille sur l'électricité atmosphérique. Parmi ses nombreuses manipulations, il en est où il fait tomber, dans des creusets de matières différentes, des liquides divers; les vapeurs de ces liquides manifestent le plus souvent des charges d'électricité. Et de Saussure conclut que *le fluide électrique entre dans la composition des vapeurs*.

Ces expériences ouvrent la discussion, qui a paru plusieurs fois close, du transport de l'électricité par l'évaporation des liquides.

4. On peut voir, dans la définition suivante de Lavoisier (année 1785), la première idée de l'électrisation des

---

(1) HAUKSBEE, *Philosophical Transactions*, 1705.

(2) NOLLET, *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris*, 1764.

(3) DE SAUSSURE, *Voyage dans les Alpes*, Neuchâtel, 1779.

gaz par voie chimique : « L'électricité n'est qu'une espèce de combustion dans laquelle l'air fournit la matière électrique, de même que, suivant moi, il fournit la matière du feu et de la lumière dans la combustion ordinaire <sup>(1)</sup>. »

Les premières expériences ayant donné des résultats positifs sur l'électrisation des gaz par voie chimique sont dues à Pouillet <sup>(2)</sup>.

Nous retrouverons dans un Mémoire de J.-J. Thomson (1892) les idées de Lavoisier et de Pouillet.

5. D'après M. A.-B. Chauveau <sup>(3)</sup>, l'électrisation des nuages de fines gouttelettes qui prennent naissance au voisinage des chutes d'eau naturelles était connue de de Saussure et de Tralles.

6. Schübler <sup>(4)</sup> constate, en Suisse, que la vapeur aqueuse du pied des cascades est fortement électrisée.

Les premières recherches sur les charges apportées au sol par la pluie <sup>(5)</sup> semblent appartenir à ce physicien.

Admettant avec Volta que l'évaporation de l'eau est une source d'électricité, Schübler explique par un unique mécanisme les masses électriques fournies par les cascades et par les pluies ; la vapeur d'eau est positive ; la goutte d'eau, négative.

7. Suivant Belli, la séparation des charges engendrées par les cataractes est due à l'action du champ terrestre :

<sup>(1)</sup> LAVOISIER, *Journal de Physique*, février 1785, p. 148.

<sup>(2)</sup> POUILLET, *Recherches sur l'origine de l'électricité atmosphérique* (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXV, p. 401).

<sup>(3)</sup> A.-B. CHAUCHEAU, *Introduction historique et bibliographique à l'étude de l'électricité atmosphérique*, Paris, 1902, p. 37.

<sup>(4)</sup> SCHÜBLER, *Météorologie* (*Journal de Schweigger*, 1811 à 1833).

<sup>(5)</sup> SCHÜBLER, *Recherches sur l'électricité atmosphérique* (*Journal de Phys.* t. LXXXIII).

sous un ciel serein, électrisé positivement, une cascade s'électrise négativement en haut, positivement en bas; « l'électricité vitrée s'écoule dans le sol, l'autre reste unie aux gouttes liquides » (1).

8. Dans les recherches de Faraday (2) sur le fonctionnement de la machine hydro-électrique d'Armstrong, l'opinion de de Saussure est réfutée, et la théorie de l'électrisation par frottement revient en faveur. Les conclusions du Mémoire peuvent se résumer comme il suit :

a. La simple évaporation de l'eau et la condensation de sa vapeur ne produisent aucune trace d'électricité.

b. Un jet de vapeur sèche ou surchauffée, c'est-à-dire parfaitement purgée de gouttelettes liquides, n'est pas électrisé; de même un jet d'air sec; un jet d'air humide, un jet de vapeur d'eau non purgée de gouttelettes liquides, sont électrisés positivement.

Une faible proportion de sels dissous dans l'eau distillée rend sa vapeur électriquement neutre.

Si l'eau contient en suspension certains corps isolants (graisses, huiles, essences, résines), sa vapeur se charge négativement, la chaudière positivement.

c. La nature des becs par lesquels s'échappe la vapeur a une grande influence : si le bec est métallique, la vapeur est positive; s'il est en ivoire, la vapeur est neutre; s'il est en buis, les charges produites sont maxima.

d. La production des charges est due au frottement des gouttelettes et des poussières contre les ajutages.

On peut admettre que cette étude marque le point de départ des recherches sur l'électrisation des gaz par pulvérisation des liquides.

(1) KAËMTZ, *Météorologie*, traduction Ch. Martins, 1858.

(2) FARADAY, *Experimental researches*, Vol. II, 1843, p. 106; *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. X, p. 88.

9. Palmieri <sup>(1)</sup> étudie les cascades artificielles, *en plein air*, à une certaine hauteur au-dessus du niveau de la terrasse de l'Observatoire du Vésuve.

Un filet d'eau tombe d'un vase isolé dans un bassin isolé; l'un des récipients est en relation avec le sol, l'autre avec un électroscope. Si l'électricité positive domine dans l'atmosphère, le vase supérieur est positif, le bassin est négatif; si l'électricité négative domine dans l'atmosphère, les signes des charges des récipients sont permutés.

Des paillettes de plomb, des poussières métalliques et même des sables ou des cendres du Vésuve, substituées à l'eau, fournissent les mêmes résultats.

Palmieri explore encore la veine liquide qui jaillit d'une fontaine de compression. Par les temps ordinaires (champ terrestre normal), la veine ascendante est positive, tandis que la veine divisée donne souvent des indices d'électricité négative.

10. Nous indiquerons ici pour mémoire la machine électrique à écoulement d'eau de Sir W. Thomson, et l'égalisateur de potentiels à filet liquide dont Palmieri s'attribue la découverte.

11. Holgrem étudie les chutes d'eau au laboratoire, et par conséquent à l'*abri du champ électrique terrestre*. Dans un Mémoire <sup>(2)</sup> publié en 1873, il montre que « lorsqu'un liquide se dissout en gouttes, il se produit une différence de potentiel dans le lieu même où se forment les gouttes ».

---

<sup>(1)</sup> LUIGI PALMIERI, *Ann. de l'Observatoire du Vésuve*, 1850 : *Lois et origines de l'électricité atmosphérique*, traduction de MM. Marcillac et Brunet, Paris, 1886, p. 6 à 8.

<sup>(2)</sup> HOLGREM, *Sur le développement de l'électricité à l'occasion de la dissolution en gouttes des liquides* (*Kongl. Sv. Vet. Ak. Handl.*, t. XI, n° 8, 1873).

12. Au cours des recherches suggérées par Sir W. Thomson et ayant pour but de vérifier si de l'air électrisé peut être transvasé par un tube métallique d'une chambre dans un autre, Magnus Maclean et Makita Goto <sup>(1)</sup> constatent des faits, alors inexplicés, que nous estimons importants relativement à l'électrisation de l'air par les chutes d'eau.

Le dispositif de ces expérimentateurs consiste en une grande cloche cylindrique (diamètre 123<sup>cm</sup>, hauteur 70<sup>cm</sup>), renversée sur une cuve à eau, et en relation :

- avec le sol par un fil métallique;
- avec un aspirateur par un tuyautage spécial;
- avec un électromètre par un collecteur à écoulement d'eau, isolé;
- avec l'air de la salle par un tube rempli de coton de verre.

Dès la mise en marche du collecteur, l'électromètre indique un potentiel positif; au bout de quelques minutes ce potentiel prend la valeur maxima + 0<sup>v</sup>,5; puis il tend vers une *valeur négative extrême*, — 5<sup>v</sup>,5 environ.

Tandis que l'état d'électrisation de l'air de la salle est sans influence sur les effets mesurés, l'état de pureté de l'air, au point de vue des *poussières*, est un facteur important du phénomène : le potentiel négatif extrême est atteint d'autant moins rapidement que l'air est plus pur; le maximum positif s'élève peu à peu, de 0<sup>v</sup>,5 à 0<sup>v</sup>,8, au fur et à mesure que l'air est mieux dépouillé de ses poussières.

Les expérimentateurs rapprochent ces faits du renversement du signe du champ électrique de l'atmosphère par temps pluvieux.

### 13. Sur les pentes du Sonnblick (Salzbourg), Elster et

---

(1) MAGNUS MACLEAN and MAKITA GOTO, *Electrification of air by water jet* (Phil. Mag., 2<sup>e</sup> semestre, 1890, p. 148).

Geitel <sup>(1)</sup> constatent que l'électrisation négative due aux chutes d'eau se fait sentir jusqu'à la hauteur de 500<sup>m</sup> au-dessus d'elles.

Ils admettent que les gouttelettes liquides, électrisées négativement, se repoussent entre elles et sont entraînées, vers le zénith, par le champ électrique terrestre.

#### DEUXIÈME PÉRIODE.

##### *Faits postérieurs à l'hypothèse de la couche double de Helmholtz.*

14. En 1892 paraît le remarquable Mémoire de Lenard <sup>(2)</sup> qui a fait attribuer à ce physicien la découverte du phénomène de l'électrisation de l'air au voisinage des chutes d'eau.

Lenard constate d'abord, au cours d'un voyage dans les Alpes, l'activité électrique des cascades et des ruisseaux tumultueux en terrain découvert. Il retrouve la même électrisation anormale de l'air au voisinage des cataractes encaissées dans des gorges étroites; d'où il tire cette conclusion importante que le champ terrestre est sans influence sur la production du phénomène étudié.

A Heidelberg, il explore le champ électrique dans une salle de bains où une douche tombe dans une baignoire; il emploie comme collecteur une lampe à pétrole (fumeuse), puis une bougie (non fumeuse); l'électroscope indique un champ très grand. Remplaçant la pomme de la douche par un ajutage conique, Lenard ne perçoit l'électrisation négative de l'air que si le jet heurte un écran de fer.

A Bonn, les mêmes expériences ne donnent pas d'effet mesurable avec l'électroscope d'Exner, mais donnent

<sup>(1)</sup> ELSTER und GEITEL, *Wien. Ber.*, t. XCIX, 1890. — EXNER's *REP.*, 1891, p. 419.

<sup>(2)</sup> Philipp LENARD, *Ueber die Electricität der Wasserfälle* (*Wied. Ann. der Phys. und Chem.*, band XLVI, 1892, p. 584).

des résultats avec l'électroscope de Hankel. Lenard fait alors cette hypothèse, justifiée plus tard, que l'eau de Heidelberg et l'eau de Bonn sont inégalement actives parce qu'elles ne présentent pas le même degré de pureté.

Il poursuit ses recherches au laboratoire de l'Institut de Physique, avec des jets d'eau verticaux, sous pression, protégés le plus souvent des influences électriques extérieures par des *treillis métalliques*. Les résultats de ces expériences peuvent être classés comme il suit :

a. Une cascade d'eau pure charge d'électricité négative l'air ambiant, à la condition que l'obstacle contre lequel s'écrase le jet soit complètement mouillé; l'eau et les gouttelettes prennent des charges positives.

b. L'intensité de l'électrisation de l'air est fonction de la grosseur des gouttes en lesquelles se résout le jet d'eau; du débit du jet; de la hauteur de liquide accumulée sur l'obstacle; de l'intensité du bouillonnement au pied de la chute.

c. Les charges positives portées par l'eau sont d'autant plus grandes que l'eau est plus pure.

L'ammoniaque et la potasse atténuent les effets donnés par l'eau pure.

L'addition à l'eau de quantités croissantes de chlorure de sodium diminue, annule, puis renverse les phénomènes d'électrisation; la solution qui donne à l'air sa charge positive maxima renferme 6,5 pour 100 de Na Cl.

Des solutions d'acide sulfurique, de sel de Glauber, inversent les effets donnés par l'eau pure.

Deux échantillons d'alcool donnent des résultats de signes contraires; l'éther, l'huile minérale, le sulfure de carbone agissent comme l'eau, mais plus faiblement; le benzol et la térébenthine agissent en sens contraire de l'eau, le premier faiblement, la térébenthine très fortement.

Le mercure est 14 fois plus actif que l'eau.

d. Dans l'hydrogène et dans le gaz d'éclairage, les effets d'électrisation sont plus faibles que dans l'air.

e. La présence de poussières dans l'air ne participe en rien à la production des phénomènes d'électrisation; toutefois ces poussières permettent à l'air de retenir plus longtemps la charge que lui a donnée la cascade <sup>(1)</sup>.

f. La simple division d'un filet d'eau par un obstacle et la simple chute de ce filet dans l'air sont aussi inefficaces l'une que l'autre comme moyens d'électrisation; il n'apparaît de charges électriques que s'il y a pulvérisation du jet par sa rencontre avec un obstacle plat <sup>(2)</sup>.

Ces résultats permettent d'expliquer l'inversion du champ terrestre par la pluie et l'électrisation permanente du globe pas l'agitation tempêteuse des mers.

Lenard coordonne les faits observés par une théorie qui fait intervenir les couches doubles de Helmholtz et la durée nécessaire à l'établissement de l'équilibre électrique au contact d'un liquide et d'un gaz <sup>(3)</sup>. L'air, chassé entre la goutte qui tombe et l'obstacle qu'elle heurte, emporte, en partie, celle des faces de la couche double qui n'est pas située dans le liquide; la séparation des charges de signes contraires est possible à la faveur de la perturbation produite dans l'équilibre électrique de l'obstacle pendant l'immersion de la goutte.

La quantité d'électricité libérée par goutte est accessible à l'expérience; d'où la densité superficielle de la couche double; d'où, en admettant que l'épaisseur de cette couche est de l'ordre du millionième de millimètre <sup>(4)</sup>, la valeur de la différence de potentiel au contact. Le calcul de Lenard indique, pour le contact air-eau,  $2,4 \cdot 10^{-6}$  volt.

<sup>(1)</sup> *Loc. cit.*, § 11.

<sup>(2)</sup> *Loc. cit.*, § 36.

<sup>(3)</sup> PASCHEN, *Wied. Ann.*, t. XLI, 1890, p. 801.

<sup>(4)</sup>  $\frac{1}{30\,000\,000}$  de millimètre d'après Lord Kelvin,  $\frac{1}{35\,000\,000}$  d'après Lippmann (*J. d. Phys.*, 2<sup>e</sup> série, t. II, 1883, p. 113).

15. Elster et Geitel <sup>(1)</sup> observent plusieurs cascades souterraines et constatent que, comme les cascades aériennes, elles chargent l'air négativement.

16. L'étude de certains phénomènes présentés par la décharge électrique dans les tubes à vide ayant amené J.-J. Thomson à penser que le moment, et même le signe, de la couche double de Helmholtz pouvait dépendre de la nature du milieu gazeux, ce physicien poursuit les recherches de Lenard, expliquées par ces couches doubles, en prenant comme variable principale la nature chimique du milieu gazeux au sein duquel se produit la cascade <sup>(2)</sup>.

*a. Influence du milieu gazeux.* — Dans une atmosphère de vapeur d'eau, l'écrasement de gouttes d'eau n'engendre pas d'électricité. Le chlore ne se charge pas par une cascade d'eau chlorée. Le gaz carbonique ne se distingue pas très notablement de l'air. La charge d'hydrogène, relativement à celle de l'air, est inversée par l'eau, les solutions aqueuses de rosaniline, fluorescéine, phénol et acide pyrogallique, et par l'alcool absolu; elle est diminuée par une solution aqueuse d'éosine; accrue par une solution aqueuse de violet de méthyle, et par des solutions alcooliques de violet de méthyle et de phénol.

*b. Solutions aqueuses et air.* — En portant en abscisses les concentrations, croissantes dans la direction  $Ox$ ; en ordonnées suivant  $Oy$  les charges positives, suivant  $Oy'$  les charges négatives, les résultats fournis par les solutions aqueuses sont représentés par les graphiques ( $\alpha$ ), ( $\beta$ ), ( $\gamma$ ). Les courbes  $\alpha$  se rapportent au phénol, à l'éosine et à la fluorescéine; les courbes  $\beta$ , à l'iodure et au permanganate de potassium, au trioxyde de chrome, au

(1) ELSTER und GEITEL, *Wied. Ann.*, t. XLVII, 1893, p. 496-497.

(2) J.-J. THOMSON, *Phil. Mag.*, avril 1894; *Les décharges électriques dans les gaz*, traduction L. Barbillion. Paris, 1900.

peroxyde d'hydrogène, à l'acide sulfurique, à la rosaniline et au violet de méthyle; les courbes  $\gamma$ , au chlorure de zinc

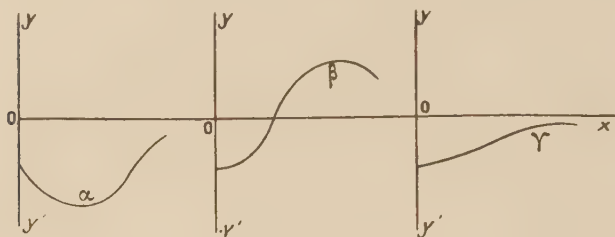


Fig. I.

et aux acides chlorhydrique, iodhydrique, oxalique, tartrique, formique.

L'acide acétique donne, par rapport à l'eau : modérément dilué, un effet inverse; faiblement dilué, un effet de même signe.

Lorsqu'une solution est inactive, elle reste inactive par l'addition de substances qui rendent l'eau très active.

*c. Solutions non aqueuses.* — La rosaniline, le violet de méthyle, la fluorescéine, l'éosine, le phénol, en solution alcoolique, donnent des effets incomparablement moindres qu'en solution aqueuse.

J.-J. Thomson est conduit à admettre que la position des feuillettes de la couche double et leur densité électrique sont réglés par la combinaison chimique, incomplète et inachevée, de structure atomique variable, qui constitue la zone de transition du milieu liquide au milieu gazeux.

17. En 1894, Lord Kelvin montre que l'air, en barbotant dans l'eau, se charge négativement. M. Maclean et A. Galt <sup>(1)</sup>, font l'étude de ce phénomène et constatent des faits analogues à ceux que donnent les cascades.

---

<sup>(1)</sup> LORD KELVIN, M. MACLEAN et A. GALT, *Electrisation de l'air et d'autres gaz par leur passage à travers l'eau et d'autres liquides* (Proc. Roy. Soc. London, t. LVII, p. 335).

18. Holgrem <sup>(1)</sup> découvre en même temps que Lord Kelvin l'électrisation par barbotage <sup>(2)</sup>.

Il s'efforce de démontrer que la simple déformation d'une surface liquide suffit pour libérer des charges électriques dans le gaz en contact avec elle. Cette conclusion importante permettrait d'expliquer la charge permanente de la Terre par la seule propagation de la houle à la surface des mers.

### TROISIÈME PÉRIODE.

*Faits postérieurs à la découverte de l'ionisation des gaz.*

19. Townsend <sup>(3)</sup>, en 1898, met en évidence la conductibilité électrique des gaz fraîchement préparés.

Elster et Geitel, en 1899, attribuent à la conductibilité de l'air un caractère ionique <sup>(4)</sup>; ils découvrent, en 1901, les propriétés radioactives de l'atmosphère <sup>(5)</sup>.

J.-J. Thomson, en 1902, découvre la conductibilité donnée à l'air par barbotage dans l'eau <sup>(6)</sup>, et par pulvérisation des liquides <sup>(7)</sup>.

Langevin, en 1905, découvre les gros ions de l'atmosphère <sup>(8)</sup>.

<sup>(1)</sup> HOLGREM, *Sur le développement de l'électricité au contact de l'air et de l'eau* (Acta Universitatis Ludensis, t. XXI, 1895).

<sup>(2)</sup> *Loc. cit.*, Chap. II, sous le titre : *Courant d'air sortant de l'eau*.

<sup>(3)</sup> J.-S. TOWNSEND, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, t. IX, part V, 1898.

<sup>(4)</sup> J. ELSTER und H. GEITEL, *Sur un appareil pour mesurer la dispersion de l'électricité dans l'air* (Phys. Zeit., t. I, 1899, p. 11).

<sup>(5)</sup> J. ELSTER und H. GEITEL, *Nouvelles expériences sur la dispersion de l'électricité dans les masses d'air closes* (Phys. Zeits., t. II, 1901, p. 560).

<sup>(6)</sup> J.-J. THOMSON, *Expériences sur la radioactivité induite dans l'air et la conductibilité électrique produite par les gaz quand ils passent à travers l'eau* (Phil. Mag., t. IV, 1902, p. 352).

<sup>(7)</sup> J.-J. THOMSON, *Conduction of electricity through gases*, p. 326; Cambridge, 1903.

<sup>(8)</sup> LANGEVIN, *Sur les ions de l'atmosphère* (C. R. A. S., t. CXL, 1905, p. 232).

20. Au cours d'une conférence faite le 5 novembre 1902, à l'Institution of Electrical Engineers, Lodge (1) indique, incidemment, un mécanisme électronique de l'ionisation par les cascades.

« Il est possible de charger un assemblage de molécules avec un excès ou un manque d'un ou plusieurs électrons par les procédés ordinaires d'électrification, mais le lien de ces électrons supplémentaires est faible, et ils peuvent être séparés des molécules par l'agitation due à la lumière ultraviolette et par plusieurs autres procédés. Même l'éclaboussement des gouttelettes de liquide peut en détacher les moins unis. »

21. Kaehler, en 1903, découvre l'ionisation de l'air par les chutes d'eau (2).

D'après M. Kaehler, une cascade d'eau distillée engendre uniquement des ions négatifs, de mobilité 4,17 cm : sec dans un champ de 1 v : cm. Une solution aqueuse à 6,5 pour 100 de sel marin donne des ions des deux signes : les ions négatifs ont même mobilité que ceux donnés par l'eau distillée ; les ions positifs ont une mobilité environ 5000 fois moindre,  $8,33 \cdot 10^{-4}$  cm : sec. La production d'ions positifs par le jet salé est liée à la nature de l'obstacle qu'il heurte.

Les ions négatifs peuvent être regardés comme des molécules ou des atomes isolés, les ions positifs comme des complexes entiers de molécules d'air.

22. M. Aselmann (3) précise les résultats de M. Kaehler ;

(1) Sir Oliver LODGE, *Sur les électrons*, traduction E. NUGUES et J. PERIDIER, Paris, 1906.

(2) K. KAehler, *Ueber die durch Wasserfälle erzeugte Leitfähigkeit der Luft* (*Ann. der Phys.*, Band XII, Heft 5, 1903, p. 1119).

(3) E. ASELMANN, *Ueber elektrizitätsträger die durch fallende Flüssigkeiten erzeugt werden* (*Ann. der Physik*, Band XIX, Heft 5, 1906, p. 960).

l'eau distillée ne donne que des ions négatifs, de mobilités diverses comprises : pour le plus grand nombre entre 4,0 cm : sec et  $1,6 \cdot 10^{-2}$  cm : sec; pour le plus petit nombre entre  $1,6 \cdot 10^{-2}$  et  $2,7 \cdot 10^{-4}$  cm : sec.

Une solution aqueuse à 0,2 pour 100 de Na Cl donne : des ions négatifs, de mobilités diverses, comprises entre 4,0 cm : sec et  $1,94 \cdot 10^{-3}$  cm : sec; des ions positifs, de mobilités diverses, comprises pour le plus grand nombre entre  $8,8 \cdot 10^{-2}$  et  $6,06 \cdot 10^{-4}$  cm : sec; pour le plus petit nombre entre  $6,06 \cdot 10^{-4}$  et  $3,4 \cdot 10^{-4}$  cm : sec.

Il estime que les ions les moins mobiles ne doivent pas être regardés comme de petits ions alourdis par condensation de vapeur d'eau.

Il est conduit à admettre l'existence d'ions de sodium, pour la plupart chargés positivement; à l'origine ces ions porteraient une charge négative, qui serait neutralisée et même, le plus souvent, inversée, par les charges positives de l'air.

23. M. Becker <sup>(1)</sup> étudie les centres électrisés produits dans divers gaz par l'écrasement d'un filet de mercure contre divers amalgames de métaux purs.

Il trouve des ions de deux signes; un grand excès de petits ions de mobilités comprises entre 0,96 et 0,015 cm : sec; très peu de gros ions, de mobilités comprises entre 6,2 et  $2,7 \cdot 10^{-3}$  cm : sec; des gouttelettes de mercure, chargées positivement, bien moins nombreuses que les ions.

Il admet que les charges seront libérées par les couches doubles aux contacts mercure-gaz-amalgames, au moment où les surfaces de contact subissent de brusques variations d'étendue par déchirement.

Les métaux et les gaz se classent en une série très analogue à la série électrochimique



(1) A. BECKER, *Ann. der Physik*, 1909, p. 909; 1910, p. 98.

24. Enfin M. Lonsdale <sup>(1)</sup> a étudié, au Cavendish Laboratory, l'ionisation produite par l'éclaboussement du mercure.

Les faits principaux que ses expériences ont mis en évidence sont les suivants :

L'éclaboussement du mercure contre une plaque de fer produit des ions des deux signes, avec un grand excès d'ions positifs. La plupart de ces ions ont une faible mobilité.

Les ions négatifs ont une mobilité de

$$4 \times 10^{-3} \text{ cm : s, volts : cm,}$$

plus faible que la mobilité  $13 \times 10^{-3}$  des ions positifs.

La nature de l'obstacle influe sur l'intensité de l'ionisation.

De plus, M. Lonsdale a été conduit à admettre, pour des hauteurs de chute supérieures à 25<sup>cm</sup> environ, la production par la cascade de doublets neutres, semblables à ceux que J.-J. Thomson a observés dans les rayons canaux. Ces doublets, disloqués par le champ du condensateur de mesure ou par toute autre cause, engendreraient tous les ions négatifs observés, en même temps que des ions positifs de mobilité beaucoup plus faible que celle indiquée ci-dessus.

---

<sup>(1)</sup> J.-J. LONSDALE, *The ionisation produced by the splashing of mercury* (*Phil. Mag.*, 6<sup>e</sup> série, t. XX, 1910, p. 464).

---

## CHAPITRE I.

### ÉTUDE DES CHARGES TOTALES.

#### DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.

25. Sauf quelques modifications, nécessitées par des recherches sur des points particuliers, le dispositif utilisé comprend :

Un vase d'où tombe, goutte à goutte, le liquide expérimenté;

Un récipient d'ionisation, où les gouttes s'écrasent contre un obstacle;

Un système d'aspiration transportant dans un appareil collecteur les charges portées par l'air qui circule dans le récipient d'ionisation;

Un appareil collecteur des charges, cylindre de Faraday ou condensateur à gros ions;

Un électromètre;

Un dispositif d'étalonnage.

La figure schématique (2) indique les positions relatives de ces différents organes, les connexions électriques et les protections électrostatiques.

Les figures (3), (4), (5) montrent quelques détails.

Le vase supérieur (*fig. 2*), disposé en vase de Mariotte, est relié au sol par un fil de platine. Le liquide s'écoule de ce vase par un tube capillaire vertical, rodé à son extrémité.

Les gouttes tombent à l'intérieur d'un gros tube de verre B fixée au couvercle du récipient d'ionisation par une monture métallique C. Le tube capillaire A et le gros tube B sont joints hermétiquement (*fig. 3*), grâce à la monture métallique *b* et à la pièce métallique *a* que la membrane en caoutchouc C suspend au coude du tube

capillaire. On réalise ainsi une étanchéité suffisante pour empêcher l'air non filtré de se glisser entre *a* et *b*; et,

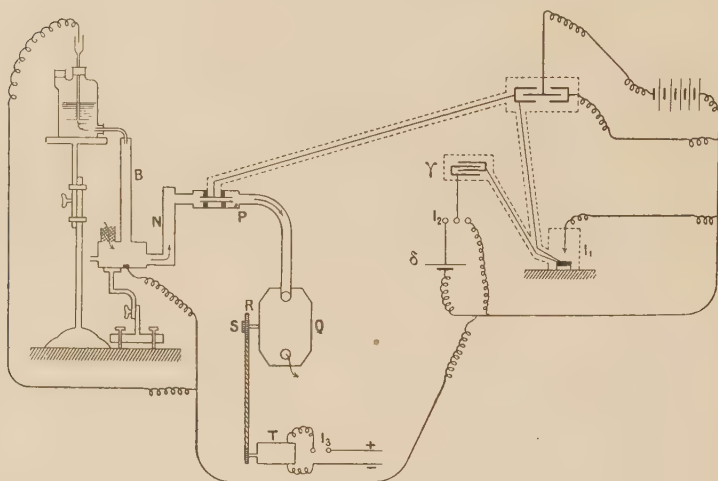


Fig. 2.

d'autre part, on peut aisément séparer le vase de Mariotte du tube B pour remplacer le liquide, et modifier la posi-

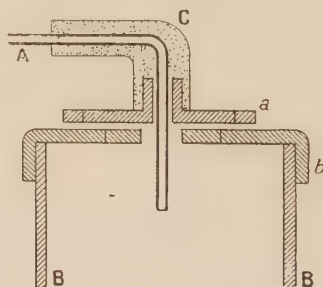


Fig. 3.

tion du tube capillaire pour régler la position du point d'écrasement des gouttes contre l'obstacle.

Les gouttes s'écrasent contre un bouchon (*fig. 5*) vissé dans le fond du récipient d'ionisation, et formé de deux

parties D et E réunies l'une à l'autre par un pas de vis. On peut ainsi remplacer l'obstacle E par un obstacle de même forme, mais de nature différente, sans altérer le régime de chute des gouttes et le régime d'aspiration.

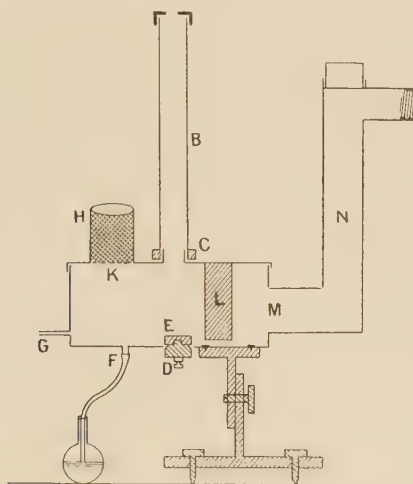


Fig. 4.

Le liquide qui a heurté l'obstacle s'écoule par la tubulure F (fig. 4) qui ne permet pas l'introduction d'air non filtré.

La tubulure latérale G, fermée par un bouchon en liège, permet d'introduire à volonté de l'air non filtré.

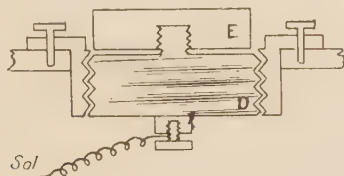


Fig. 5.

L'air pénètre dans le récipient d'ionisation à travers un tampon de coton, tassé dans la large tubulure H qui fait

corps avec le couvercle et que ferme la toile métallique K.

A la tubulure H peut s'adapter un autre filtre dont il sera parlé dans la dernière partie du Chapitre II.

Le couvercle du récipient d'ionisation porte une vanne L qui, par une rotation convenable du couvercle, obture l'ouverture M du tuyautage N d'aspiration.

L'armature extérieure du cylindre de Faraday P (*fig. 2*), se visse dans le tuyau N. Le cylindre lui-même est constitué par un tube métallique ouvert aux deux bouts, rempli de coton, isolé de son armature par un anneau d'ambroïde, et protégé par un anneau de garde. Le joint entre le cylindre et son armature est étanche. Le cylindre est réuni : à l'électromètre, à travers l'ambroïde, par un fil protégé des influences électriques extérieures ; à l'appareil d'aspiration par un tuyau en caoutchouc.

Un condensateur cylindrique, décrit au Chapitre II, peut être substitué au cylindre de Faraday.

Le courant d'air, qui entraîne les charges produites dans le récipient d'ionisation, est dû à la dépression que tend à produire dans ce récipient un compteur à gaz Q, du type *Duplex* de 20 becs, fonctionnant comme aspirateur, et conduit par un moteur électrique T.

Par tour, le compteur débite un volume d'air de 14<sup>1</sup>/<sub>3</sub>.

Le moteur électrique est alimenté par une batterie de gros accumulateurs. L'axe du compteur porte deux pignons ; pour un même voltage aux bornes du moteur, on peut obtenir deux vitesses d'aspiration notablement différentes (à peu de chose près dans le rapport de 1 à 5).

L'électromètre Curie, à amortissement magnétique, ne diffère du modèle ancien que par la suspension de l'aiguille, faite ici par un ruban de bronze phosphoreux. Les déplacements du spot sont lus sur une règle placée à 1<sup>m</sup> du miroir de l'électromètre. Les temps sont mesurés par un compteur donnant les  $\frac{4}{10}$  de seconde. L'aiguille de l'élec-

tromètre est chargée à environ 45 volts par une batterie de petits accumulateurs.

La mise au sol du système isolé est réalisée par un interrupteur spécial,  $I_1$  (*fig. 2*), manœuvré à la main : une aiguille verticale, en communication permanente avec le sol, portée par un bloc prismatique mobile dans une coulisse prismatique et réglable, peut être amenée au contact, ou séparée, d'un petit disque en cuivre appartenant au système isolé. L'ensemble mobile de cet interrupteur ne pèse guère plus de 10<sup>g</sup>.

L'une des armatures d'une capacité étalon,  $\gamma$ , de 30 U.E.S., appartient au système isolé; l'autre armature, normalement au sol, peut être reliée à un élément Daniell,  $\delta$ ; une charge connue peut donc être induite sur le système isolé; l'observation de la déviation correspondante du spot permet l'étalonnage de l'installation.

#### EAU DISTILLÉE.

##### Facteurs physiques du phénomène.

26. Considérant comme acquis, par les travaux de MM. Kaehler et Aselmann, que l'écrasement d'un filet d'eau distillée contre un obstacle n'engendre sur l'air ambiant que des ions d'un seul signe, nous nous sommes d'abord proposé d'examiner comment interviennent, au point de vue de la *charge totale* transportée par l'air, les différentes conditions physiques qu'on peut se fixer *a priori* pour produire le phénomène. Nous avons ainsi été conduit à recueillir, dans le cylindre de Faraday décrit ci-dessus, les charges véhiculées par l'air, et à examiner successivement les influences propres : à la hauteur de chute, à la grosseur ou à l'électrisation préalable des gouttes d'eau distillée; à l'étendue, à la forme, à la nature et à l'électrisation préalable de l'obstacle.

27. *Hauteur de chute.* — L'eau distillée tombe sur un disque en cuivre recouvert, par voie électrolytique, d'une mince couche de platine. Les expériences sont conduites en mesurant les temps nécessaires à la production d'une charge arbitrairement choisie: des nombres inversement proportionnels à ces temps nous donnent, en unités arbitraires, les charges produites par centimètre cube d'eau distillée.

Les Tableaux ci-dessous résument les résultats :

| Hauteur<br>de chute.<br>cm | Charges<br>par cm <sup>3</sup> d'eau. | Observations.                                                                                                            |
|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 130.....                   | 40                                    | Grosseur des<br>gouttes<br>0cm <sup>3</sup> , 070.<br>—<br>Débit du liquide,<br>1cm <sup>3</sup> en 11 <sup>s</sup> , 3. |
| 120.....                   | 27                                    |                                                                                                                          |
| 110.....                   | 25                                    |                                                                                                                          |
| 100.....                   | 25                                    |                                                                                                                          |
| 85.....                    | 24                                    |                                                                                                                          |
| 63.....                    | 22                                    |                                                                                                                          |
| 50.....                    | 16                                    |                                                                                                                          |
| 40.....                    | 9                                     |                                                                                                                          |
| 30.....                    | 6                                     |                                                                                                                          |
| 20.....                    | 3                                     |                                                                                                                          |
| 10.....                    | 137                                   | Filet liquide.<br>—<br>Débit du liquide,<br>1cm <sup>3</sup> en 1 <sup>s</sup> , 7.                                      |
| 9.....                     | 132                                   |                                                                                                                          |
| 8.....                     | 130                                   |                                                                                                                          |
| 7.....                     | 100                                   |                                                                                                                          |
| 6.....                     | 94                                    |                                                                                                                          |
| 5.....                     | 16                                    |                                                                                                                          |
| 4.....                     | 0                                     |                                                                                                                          |

Pour les faibles hauteurs de chute, nous n'avons recueilli des charges électriques que lorsque quelques bulles d'air s'agitaient dans le liquide autour du point d'impact sur l'obstacle.

Pour les grandes hauteurs de chute, il y a fragmentation des gouttes contre l'obstacle, en un mot pulvérisation.

28. *Grosseur des gouttes.* — En adaptant au vase d'écoulement du liquide des tubes capillaires de divers

diamètres intérieurs et extérieurs, nous avons obtenu des gouttes de volumes différents. On forme de très petites gouttes au moyen d'ajutages métalliques du genre de ceux qui terminent les seringues de Pravaz.

| Volume<br>des gouttes.<br>cm <sup>3</sup> | Charges<br>par cm <sup>3</sup> d'eau. |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| 0,007.....                                | 37                                    |
| 0,044.....                                | 91                                    |
| 0,070.....                                | 127                                   |
| 0,079.....                                | 275                                   |

29. *Force vive et pulvérisation des gouttes.* — Les résultats ci-dessus montrent que l'efficacité de la cascade croît avec la hauteur de chute et avec le volume de la goutte. Nous n'avons pas trouvé de relation simple entre les charges recueillies et les variables étudiées, ou une fonction de ces variables telle que la force vive des gouttes ou la surface totale donnée à 1<sup>cm</sup><sup>3</sup> d'eau en le débitant par gouttes.

Nous avons essayé de nous rendre grossièrement compte de l'accroissement du nombre des gouttelettes produites par l'écrasement d'une goutte donnée, en fonction de l'accroissement de la hauteur de chute.

A cet effet nous avons compté les points d'impact, *visibles à l'œil nu* sur une feuille de papier blanc, fournis par l'écrasement d'une goutte d'eau colorée (fluorescéine). Pour des hauteurs de chute de 25<sup>cm</sup>, 45<sup>cm</sup> et 60<sup>cm</sup>, nous avons compté 10, 67 et 88 gouttelettes.

On peut donc dire que l'efficacité d'une cascade croît avec l'intensité de la pulvérisation des gouttes, et commence lorsqu'on observe un barbotage d'air au pied de la chute.

30. *Électrisation préalable du liquide.* — Il est aisé de vérifier, au moyen d'un cylindre de Faraday et d'un élec-

tromètre, qu'une goutte d'eau transporte une charge d'électricité après être sortie d'un orifice capillaire; la déviation du spot n'est pas imputable à l'effet qui accompagne l'écrasement de la goutte contre le fond du cylindre, car cet effet engendre une somme algébrique de charges rigoureusement nulle.

Dans l'impossibilité d'éliminer cette charge initiale des gouttes, nous l'avons, pour étudier son rôle, exagérée. En reliant le vase de Mariotte à l'un quelconque des pôles d'une batterie d'accumulateurs, nous n'avons constaté ni accroissement, ni diminution sensibles de l'efficacité de la cascade.

Cette expérience montre, en outre, que si l'effet électrique des cascades se produit à la surface du sol, lors des pluies, son intensité est indépendante de la grandeur et du signe de la charge préalable des gouttes de pluie.

31. *Électrisation préalable de l'obstacle.* — En isolant du fond du récipient d'ionisation le bouchon métallique sur lequel s'écrasent les gouttes, et en établissant entre ce bouchon et les parois du récipient une différence de potentiel fixe, on constate une diminution de l'efficacité de la cascade, d'autant plus grande que la différence de potentiel est elle-même plus grande.

Ce fait s'explique par la disparition, avant leur arrivée au cylindre de Faraday et sous l'action du champ créé au pied de la cascade, des ions les plus mobiles parmi ceux qui constituent normalement la charge véhiculée par l'air.

Le même phénomène doit se produire à la surface du sol lorsqu'il pleut : les ions engendrés sont entraînés par le champ terrestre. Si, à un moment donné, le champ terrestre est inversé, la charge positive du sol s'oppose à la diffusion des ions négatifs; et, en air calme, avec une pluie électriquement neutre, l'inversion du champ doit tendre à disparaître.

32. *Forme et étendue de l'obstacle.* — La forme de l'obstacle intervient par l'inclinaison de sa surface au point d'impact des gouttes.

En remplaçant le bouchon métallique par une demi-sphère en cuivre, ou par des prismes en verre d'angles divers, on voit décroître rapidement les charges engendrées, lorsque l'inclinaison croît au delà de  $35^\circ$ .

Pour des inclinaisons de  $0^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  nous avons obtenu des charges de grandeur 10, 9, 7, 4.

Il est d'ailleurs facile de constater que l'intensité de la pulvérisation des gouttes décroît rapidement lorsque l'inclinaison de l'obstacle augmente

L'étendue de l'obstacle est sans influence sur la grandeur et le signe de la charge produite, pourvu que l'obstacle soit : ou bien conducteur et en communication avec le sol, ou bien totalement recouvert d'une couche d'eau.

33. *Nature de l'obstacle.* — En substituant au disque platiné, qui constitue la partie supérieure du bouchon, des disques égaux en laiton, cuivre, fer ou zinc, ou bien recouverts d'une couche d'or, d'argent, de nickel, d'amalgame de cuivre, d'amalgame d'argent, on ne constate pas de différences systématiques dans la grandeur du phénomène d'électrisation; et la charge véhiculée par le courant d'air reste négative.

Un disque de verre, une plaque de marbre donnent le même résultat.

Le soufre et la paraffine ne fournissent, pendant les 3 ou 4 premières minutes de la chute d'eau, que des charges très faibles (de 10 à 15 fois inférieures aux précédentes). Mais, au bout d'un certain temps, le soufre donne la même charge que les métaux : il est alors entièrement mouillé; la paraffine, au contraire, reste non mouillée, et ne cesse pas de provoquer l'apparition de charges très faibles.

Le bois, la gutta, le caoutchouc, l'ébonite, la gomme

laque se classent, au point de vue de leur efficacité, entre les métaux et la paraffine. Il en est de même du sable, du gravier et des divers échantillons de terres et de feuilles végétales (fig. 6).

Lorsque la chute d'eau se produit sur une couche d'eau, la grandeur de la charge mesurée est fonction de l'épaisseur de cette couche. On observe qu'une ou plusieurs

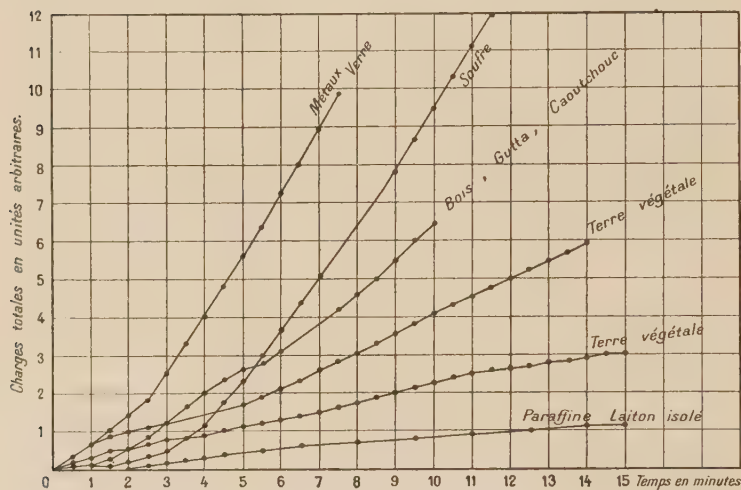


Fig. 6.

bulles d'air cheminent dans le liquide au voisinage du point d'impact de la goutte; il y a *barbotage* de l'air dans l'eau.

Si l'obstacle est constitué par de l'eau de mer, la charge recueillie dans le cylindre de Faraday est nulle.

Dans la figure ci-dessus, qui exprime quelques-uns de nos résultats, les abscisses représentent des temps, ou, ce qui revient au même, des centimètres cubes d'eau débités; les ordonnées représentent en unités arbitraires les charges recueillies.

On voit que l'obstacle intervient par sa nature chi-

mique (eau de mer, eau distillée) et par l'intensité de la pulvérisation ou du barbotage qu'il provoque (couches d'eau de différentes épaisseurs). Il semble aussi intervenir par sa conductibilité (bois, gutta, caoutchouc, soufre, etc., au début des mesures), les corps isolants donnant des charges progressivement croissantes au fur et à mesure que leur faculté d'isolement disparaît.

34. *Isolement de l'obstacle.* — Afin de préciser cette dernière remarque, nous avons réalisé les deux expériences suivantes :

a. Un disque de laiton est isolé sur un bloc de paraffine qui recouvre le fond du récipient d'ionisation. Quoique la pulvérisation provoquée par cet obstacle reste la même quand son support est, soit la paraffine, soit le bouchon du récipient, les charges recueillies dans les deux cas sont totalement différentes; elles varient en effet dans le rapport de 1 à 15. Isolé par un bloc de paraffine, le disque métallique joue le même rôle, quant à la production des charges, qu'un obstacle en paraffine.

b. Un disque de laiton  $\mathcal{D}$  (fig. 7) est maintenu dans

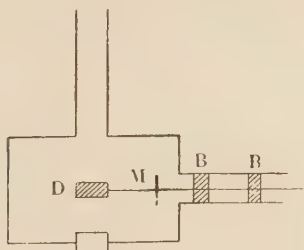


Fig. 7.

la région centrale du récipient d'ionisation au moyen d'une tige que supportent deux bouchons d'ambroïde BB, fixés dans une tubulure latérale. Un écran M protège l'am-

broïde des gouttelettes qui rejaillissent du disque. Celui-ci peut être mis en relation avec le sol ou bien isolé.

Lorsque l'obstacle est mis au sol, les charges recueillies par unité de temps sont sensiblement constantes, oscillant entre les valeurs 37 et 41; lorsque, au contraire, le disque est isolé, les charges recueillies oscillent entre les nombres 8 et 34, variant dans le rapport de 1 à 4 environ. Plusieurs séries de mesures, d'une durée individuelle de 10 minutes, nous ont toujours fourni les mêmes nombres. Les limites 8 et 34, dans le cas du disque isolé, s'expliquent par la décharge intermittente du disque, due à l'écoulement intermittent de l'eau qu'il reçoit.

La possibilité pour les charges électriques communiquées au liquide de rester accumulées sur l'obstacle ou de s'écouler au sol constitue donc un trait caractéristique du phénomène étudié.

De plus, ces expériences montrent avec netteté que la séparation des charges négatives transportées au cylindre de Faraday par le courant d'air et des charges positives retenues par l'eau se fait au point d'impact des gouttes. Il n'y a donc par lieu de chercher une explication du phénomène des cascades dans le frottement contre l'air, soit des gouttes qui tombent vers l'obstacle, soit des gouttelettes qui rebondissent du point d'impact des gouttes.

#### **Grandeur des charges mesurées. Maximum d'ionisation.**

35. Avec de l'eau distillée commerciale, de provenances diverses, et avec une hauteur de chute de  $62^{\text{cm}},5$ , des gouttes de  $0^{\text{cm}},076$  et un disque platiné, nous avons obtenu, par centimètre cube d'eau, des charges variant de  $5,0 \cdot 10^{-2}$  à  $6,5 \cdot 10^{-2}$  U.E.S.

Parmi les observations de Ph. Lenard, celles dont les données expérimentales sont les plus voisines des nôtres indiquent la production d'une charge sensiblement égale

à celle que nous avons observée. Ph. Lenard obtint en effet

$$0,89.10^{-12} \text{ coulomb}$$

par goutte de 4<sup>mm</sup>, 4 de diamètre, heurtant une plaque de tôle humide avec une vitesse de 6<sup>m</sup>,8 par seconde; soit, par centimètre cube d'eau,

$$6,4.10^{-2} \text{ U. E. S.}$$

Par une rotation convenable du couvercle du récipient d'ionisation, on peut obturer le tuyautage d'aspiration et donner au volume du récipient une valeur bien définie ( $V = 1600\text{cm}^3$ ). Une rotation inverse du couvercle et l'arrêt simultané de la chute d'eau permettent d'aspirer et de mesurer la charge  $Q$ , gagnée par l'air en un temps donné. On constate qu'au bout d'un petit nombre de minutes de chute, la charge portée par l'air du vase clos atteint une valeur maxima.

L'expérience nous a donné une densité cubique

$$\rho = \frac{Q}{V},$$

comprise entre  $6,8.10^{-5}$  et  $9,6.10^{-5}$  UES. La valeur moyenne fournie par l'ensemble de nos mesures a été

$$\rho = 8,7.10^{-5} \text{ U. E. S.}$$

En prenant  $4,2.10^{-10}$  comme valeur de la charge corpusculaire, le nombre moyen d'ions par centimètre cube d'air est de  $2.10^{-5}$ . Or, les agents d'ionisation les plus actifs fournissent <sup>(1)</sup> un maximum de  $10^9$  ions de chaque signe par centimètre cube d'air. Les cascades d'eau distillée peuvent donc être considérées comme à peu près 5000 fois moins efficaces que les agents d'ionisation les plus actifs.

---

(1) M<sup>me</sup> CURIE, *Traité de Radioactivité*, t. I, 1910, p. 33.

### Mobilité globale des ions.

36. Lorsque, la cascade en marche et l'aspiration stoppée, l'air du récipient est au maximum d'ionisation, il y a égalité entre le nombre d'ions engendrés par la cascade et le nombre d'ions disparaissant sous l'action des forces électrostatiques. Traduite sous forme algébrique, cette remarque permet le calcul de la *mobilité globale* des ions.

En effet, d'une part, l'observation du spot en régime permanent (cascade et aspiration en marche) fait connaître la charge  $q$  engendrée par la cascade dans l'unité de temps.

D'autre part, la connaissance de la charge  $Q$  en équilibre statistique fournit la densité

$$\rho = \frac{Q}{V}$$

par unité de volume.

Si  $k$  est la mobilité des charges dans l'élément de volume où la vitesse de déplacement est  $U$  et où le champ est  $F$ , on a :

$$U = kF,$$

définition de la mobilité;

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \text{Div. } U = 0,$$

équation d'Euler;

$$\text{Div. } F + 4\pi\rho = 0,$$

équation de Poisson; l'élimination de  $U$  et de  $F$  donne la relation

$$(1) \quad d\rho = -4\pi k \rho^2 dt.$$

La variation de charge, par unité de volume et pendant le temps  $dt$ , due à l'action de la cascade est d'ailleurs

$$d\rho = + \frac{q}{V} dt.$$

L'équilibre statistique exige

$$-4\pi k \rho^2 dt + \frac{q}{V} dt = 0,$$

d'où

$$k = \frac{q}{4\pi \rho^2 V}$$

ou

$$k = \frac{qV}{4\pi Q^2}.$$

Avec les données expérimentales suivantes :

déviatiou en régime permanent égale à 120 divisions de l'échelle en 60 secondes ;

charge Q mesurée par 146 divisions de l'échelle ;

charge d'étalonnage (1 daniell sur un coefficient d'influence de 30 U.E.S.) mesurée par 107 divisions ;

$$V = 1600 \text{ cm}^3;$$

nous avons calculé, par la formule ci-dessus, une mobilité globale de 12,7 cm : s. dans un champ de 1 U.E.S. : cm, soit

$$k = 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ cm : s}$$

dans un champ de 1 volt : cm.

Ce résultat concorde avec celui de M. Aselmann <sup>(1)</sup>, qui a assigné au plus grand nombre des ions produits par l'eau distillée des mobilités comprises entre 4,0 cm : s et  $1,6 \cdot 10^{-2}$  cm : s.

En calculant la mobilité globale par la formule

$$(2) \quad \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho} = 4\pi k T$$

(méthode de Townsend) dans laquelle  $\rho_1$  et  $\rho$  sont les densités aux époques  $t+T$  et  $t$ , nous avons obtenu pour  $k$  la valeur

$$4,0 \cdot 10^{-3} \text{ cm : s, volts : cm,}$$

environ 10 fois moindre que la précédente. Ce résultat

(1) Voir ci-dessus, § 22.

s'explique par l'alourdissement des ions, dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau, pendant le temps  $T$ ; autrement dit : dans l'équation (1),  $k$  est fonction de  $t$ , et par suite l'équation (2) n'est pas équivalente à l'équation (1).

### Interprétation de quelques expériences anciennes.

37. Depuis de Saussure jusqu'à Gaugain, et même plus récemment, de nombreux physiciens ont essayé de démontrer le transport de masses électriques par l'évaporation de l'eau, en mesurant la charge gagnée par un creuset métallique chauffé, dans lequel tombait un filet d'eau. Parmi les différentes causes d'erreur, il en est une commune à toutes ces expériences, l'effet d'ionisation dû à l'écrasement du liquide contre l'obstacle.

La même faute expérimentale a été commise chaque fois que, sans précaution spéciale, on a voulu, par l'intermédiaire d'un collecteur à écoulement d'eau, mesurer le potentiel en un point d'une masse d'air enfermée dans un vase clos. On devait fatalement arriver au potentiel correspondant à l'ionisation maxima de la masse d'air, et non pas, comme on l'espérait, à la connaissance de la charge portée initialement par l'air.

Ainsi s'explique la limite de potentiel observée par M. Maclean et M. Goto dans l'expérience que nous avons précédemment rappelée (1).

Interprétant une série d'expériences analogues de Lord Kelvin et M. Maclean (2), M. A.-B. Chauveau (3) a calculé que la densité électrique correspondant au potentiel mesuré était  $2,5 \cdot 10^{-5}$  U.E.S.; ce nombre est précisément

(1) Voir ci-dessus § 12.

(2) Lord KELVIN et Magnus MACLEAN, *On the electrification of air* (*Phil. Mag.*, t. XXXVIII, 1894, p. 225).

(3) A.-B. CHAUVÉAU, *Étude de la variation diurne de l'électricité atmosphérique*, Paris, 1902.

du même ordre de grandeur que celui que nous avons donné pour représenter le maximum d'ionisation par l'effet des chutes d'eau.

## SOLUTIONS AQUEUSES.

38. Nous avons étudié, au point de vue des charges totales recueillies dans le cylindre de Faraday, quelques solutions aqueuses, en variant la nature des corps dissous et les concentrations des liqueurs.

Notre examen a porté sur :

|      |                                 |                                    |
|------|---------------------------------|------------------------------------|
| HCl  | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  | CH <sub>3</sub> —CO <sub>2</sub> H |
| NaCl | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                                    |
| KCl  | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  |                                    |
|      | MgSO <sub>4</sub>               |                                    |

Partant d'une solution mère qui renfermait, par litre, environ une molécule-gramme du corps étudié, nous l'avons étendue, par dédoublements successifs, jusqu'à une concentration  $2^{-20}$  fois moindre. La dernière liqueur préparée renfermait donc approximativement  $10^{-9}$  molécule-gramme par litre. Il eût été certainement illusoire de pousser plus loin les dilutions, en raison des poussières accumulées au cours des dédoublements successifs. Nous attribuons précisément à la présence de ces poussières dans nos liqueurs les plus étendues les irrégularités, la non-continuité des nombres mesurant les charges recueillies.

Nous avons représenté graphiquement (*fig. 8*) quelques-uns de nos résultats. Les abscisses sont proportionnelles aux logarithmes des concentrations. Les ordonnées sont proportionnelles aux charges recueillies par unité de temps et, par conséquent, à très peu de chose près, aux charges fournies par centimètre cube des liqueurs.

En raison des résultats particuliers qu'elles avaient

donnés à J.-J. Thomson, les solutions aqueuses d'acide acétique ont été l'objet de plusieurs séries d'expériences.

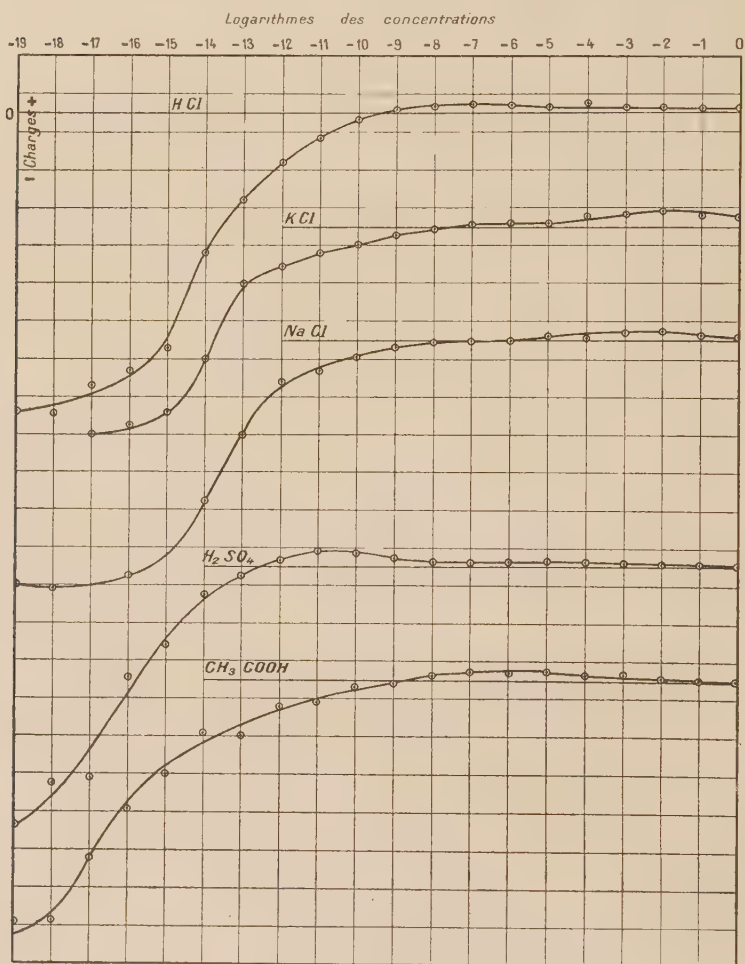


Fig. 8. — Cascades des solutions aqueuses.  
Charges totales transportées par un courant d'air.

Il est manifeste, d'après nos graphiques, que l'intensité du phénomène électrique mesuré est liée à la concen-

tration de la solution étudiée : les solutions les plus diluées donnent à l'air une charge négative (inférieure à celle que lui donne l'eau distillée commerciale); la grandeur de la charge recueillie diminue rapidement lorsqu'on chemine vers les concentrations croissantes; puis elle s'annule, change de signe, passe par un maximum faible et mal défini, et tend vers zéro.

J.-J. Thomson a appelé *points neutres* les points d'ordonnée nulle correspondant à l'inversion du signe de la charge. Il ne semble pas que l'abscisse qui définit le point neutre d'une solution donnée soit liée par une relation simple à la fonction chimique de la substance dissoute (sel neutre ou acide fort ou faible), ni à la concentration moléculaire ou à la valence des ions électrolytiques de cette solution.

Dans le Tableau ci-après nous avons indiqué les concentrations en fonction de la concentration  $m$  de la liqueur mère.

Les liqueurs qui ont servi de point de départ à nos expériences renfermaient :

|                                               |                                                           |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <i>Liqueur chlorhydrique.</i>                 | 30 <sup>cm³</sup> , 2 de HCl pur par litre.               |
| <i>Liqueur de chlorure de potassium</i> ..... | 74 <sup>g</sup> , 4 de sel commercialement pur.           |
| <i>Liqueur de chlorure de sodium</i> .....    | 58 <sup>g</sup> , 4 de sel commercialement pur.           |
| <i>Liqueur sulfurique</i> .....               | 53 <sup>cm³</sup> , 2 de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . |
| <i>Liqueur de sulfate de potassium</i> .....  | 10 <sup>g</sup> , 89 de sel commercialement pur.          |
| <i>Liqueur de sulfate de sodium</i> .....     | 35 <sup>g</sup> , 50 de sel commercialement pur.          |
| <i>Liqueur de sulfate de magnésium</i> .....  | 120 <sup>g</sup> de sel commercialement pur.              |
| <i>Liqueur acétique</i> .....                 | 256 <sup>g</sup> d'acide acétique cristallisable.         |

## Charges totales.

| Concen-<br>trations.  | H Cl.  | K Cl.  | Na Cl. | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . | MgSO <sub>4</sub> . | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> . |
|-----------------------|--------|--------|--------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------------------------------|
| 2° m....              | + 0,3  | + 2,5  | + 0,7  | + 0,8                            | + 2,5                            | + 2                               | - 0,2               | 0                                              |
| 2 <sup>-1</sup> ....  | + 1,3  | + 2,5  | + 0,7  | + 0,9                            | + 3,3                            | + 1,8                             | + 0,5               | + 0                                            |
| 2 <sup>-2</sup> ....  | + 1,3  | + 4,1  | + 2,3  | + 0,8                            | + 1,8                            | + 2                               | + 0,9               | + 1,1                                          |
| 2 <sup>-3</sup> ....  | + 1,3  | + 3,5  | + 1,6  | + 1,8                            | + 1,5                            | + 2                               | + 0,8               | + 2,1                                          |
| 2 <sup>-4</sup> ....  | + 2,0  | + 2,3  | + 0,6  | + 1,4                            | + 1,3                            | + 1,5                             | + 0,5               | + 1,3                                          |
| 2 <sup>-5</sup> ....  | + 1,5  | + 1,5  | + 1,3  | + 2,0                            | + 0,3                            | + 1,8                             | + 1,5               | + 2                                            |
| 2 <sup>-6</sup> ....  | + 2,0  | + 0,9  | + 0,1  | + 2,0                            | - 0,5                            | + 0,5                             | + 0,5               | + 1,5                                          |
| 2 <sup>-7</sup> ....  | + 2,0  | + 0,4  | - 0,1  | + 1,8                            | - 3,5                            | + 0,5                             | + 1,2               | + 2                                            |
| 2 <sup>-8</sup> ....  | + 1,5  | - 0,5  | - 0,5  | + 1,6                            | - 8                              | - 10                              | - 0,4               | + 1                                            |
| 2 <sup>-9</sup> ....  | + 0,5  | - 2,1  | - 1,8  | + 2,0                            | - 16,5                           | - 21                              | - 5                 | - 1                                            |
| 2 <sup>-10</sup> .... | - 2,0  | - 4,8  | - 4,5  | + 3,3                            | - 14,5                           | - 22,5                            | - 7                 | - 2                                            |
| 2 <sup>-11</sup> .... | - 6,5  | - 7,2  | - 8,3  | + 4,0                            | - 17,5                           | - 24,5                            | - 11                | - 6                                            |
| 2 <sup>-12</sup> .... | - 13,0 | - 11   | - 11   | + 1,5                            | - 48,5                           | - 37,5                            | - 14                | - 7                                            |
| 2 <sup>-13</sup> .... | - 22,5 | - 15   | - 24   | - 2,8                            | - 49                             | - 40                              | - 24                | - 15                                           |
| 2 <sup>-14</sup> .... | - 36,5 | - 35,5 | - 42   | - 7,0                            | - 57                             | - 50                              | - 34                | - 14                                           |
| 2 <sup>-15</sup> .... | - 62,5 | - 48,5 | - 62   | - 21                             | - 74                             | - 50                              | - 45                | - 25                                           |
| 2 <sup>-16</sup> .... | - 68   | - 52,5 | - 62   | - 24                             | - 76                             | - 57,5                            | - 45                | - 34                                           |
| 2 <sup>-17</sup> .... | - 72   | - 54   | »      | - 51                             | - 82                             | - 60                              | - 37                | - 47                                           |
| 2 <sup>-18</sup> .... | - 79   | »      | - 65,5 | - 52                             | - 85                             | - 71                              | - 42                | - 64                                           |
| 2 <sup>-19</sup> .... | - 79   | »      | - 65   | - 63,5                           | - 75                             | - 76                              | - 50                | - 64                                           |
| 2 <sup>-20</sup> .... | - 77   | »      | - 65   | - 62                             | - 87                             | - 78                              | - 54                | - 64                                           |
| 2 <sup>-21</sup> .... | - 77,5 | »      | »      | »                                | »                                | - 77                              | »                   | »                                              |

## Influence de la température.

39. D'après J.-J. Thomson (<sup>1</sup>), l'accroissement de la température des gouttes d'eau distillée a pour effet d'accroître la masse totale d'électricité produite par l'écrasement de ces gouttes et transportée par le courant gazeux :

| Températures. | Déviation. |
|---------------|------------|
| 15° C.....    | -230       |
| 75.....       | -390       |
| 95.....       | -420       |

(<sup>1</sup>) J.-J. THOMSON, *Philosophical Magazine*, 1<sup>er</sup> semestre 1894, p. 350.

Ce physicien a aussi observé que, lorsqu'on accroît la température d'une solution de rosaniline, la masse d'électricité mesurée sur l'air commence par croître, puis décroît et change de signe :

| Températures. | Déviation. |
|---------------|------------|
| 15° C.....    | +180       |
| 70.....       | +260       |
| 75.....       | +120       |
| 90.....       | —20        |
| 95.....       | —40        |

D'après M. L. Bloch<sup>(1)</sup>, dans les phénomènes d'ionisation par barbotage, la production des ions ne semble pas varier d'une façon notable lorsque la température du liquide expérimenté varie de 0° C. à 65° C.

40. Les recherches concernant le rôle de la température dans les phénomènes d'ionisation par les cascades ou par le barbotage sont particulièrement délicates. Il convient en effet de se mettre à l'abri de l'émission de charges électriques par les récipients chauffés qui font partie du dispositif expérimental; il faut aussi éviter l'échauffement du cylindre de Faraday par le courant gazeux, afin d'éliminer tout effet thermo-électrique dans le système isolé; la condensation, dans le collecteur des charges, des vapeurs du liquide expérimenté crée des difficultés d'isolement considérables; enfin, les gaz dégagés par la flamme employée au chauffage produisent des charges auxquelles il faut soustraire le courant gazeux.

Après de nombreuses tentatives, infructueuses parce que nous n'avons pas pu nous débarrasser de l'effet parasite dû à l'échauffement de l'obstacle métallique, nous avons renoncé à étudier le rôle de la température dans le

---

(<sup>1</sup>) L. BLOCH, *Thèse de Doctorat*, Paris, 1910, p. 148.  $\frac{1}{2}$

phénomène des cascades même, et nous nous sommes adressé aux phénomènes de barbotage, très analogues aux premiers ainsi que nous le montrerons plus loin.

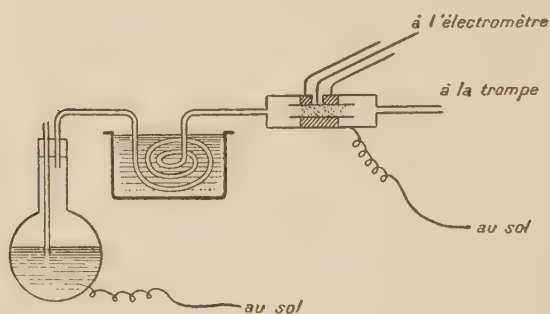


Fig. 9.

Le liquide était contenu dans un ballon en verre de 2<sup>l</sup>, environ de capacité. Le courant d'air, chargé par barbotage, traversait un réfrigérant en verre (*fig. 9*), constitué par un tube enroulé en une spirale plane et disposée horizontalement dans un cristalliseur; le diamètre du tube de verre était de 1<sup>cm</sup> environ. Le liquide provenant des vapeurs condensées dans un pareil réfrigérant n'obstrue qu'une faible partie de la section droite du serpent; de sorte qu'on n'observe pas, dans le réfrigérant, de barbotage, accidentel et variable, capable de masquer l'effet étudié.

L'expérience nous a montré qu'après une ébullition prolongée d'eau distillée dans le ballon, le courant d'air, en l'absence de barbotage, n'apporte au cylindre de Faraday qu'une charge négligeable.

Les Tableaux ci-après indiquent les charges recueillies par minute dans le cylindre de Faraday, à des époques successives exprimées en minutes à partir de l'époque initiale, pendant le refroidissement du liquide.

*Eau distillée; température initiale 60° :*

| Époques. | Charges. |
|----------|----------|
| 0.....   | —62      |
| 3.....   | —59      |
| 9.....   | —52      |
| 12.....  | —50      |
| 18.....  | —45      |
| 21.....  | —44      |
| 24.....  | —42      |
| 27.....  | —38      |
| 30.....  | —33      |

*Solution aqueuse de chlorure de potassium renfermant 1 molécule-gramme par litre; température initiale 60° :*

| Époques. | Charges. |
|----------|----------|
| 0.....   | +6       |
| 1.....   | +4       |
| 2.....   | +4       |
| 3.....   | +3       |
| 5.....   | +3,5     |
| 6.....   | +3,5     |
| 7.....   | +2,7     |
| 8.....   | +2,5     |
| 9.....   | +2,0     |
| 10.....  | +1,8     |

Une solution renfermant 1 molécule-gramme de potasse par litre, sensiblement neutre à la température de 15°, s'est montrée aussi sensiblement neutre à 60°. De même une solution saturée de ferrocyanure de potassium, faiblement négative à froid, est restée faiblement négative à chaud.

Une solution saturée de sulfate de cuivre, faiblement positive à froid, s'est montrée plus active, et positive, à chaud.

De l'alcool ordinaire titrant 90°, donnant à la température ordinaire une charge positive mesurée par 1,5, a donné, à la température de 35°, une charge mesurée par 6.

41. Il résulte de ces expériences que la température est un des facteurs du phénomène d'ionisation par barbotage, comme elle est, d'après J.-J. Thomson, un des facteurs du phénomène des cascades. A une élévation de température correspond une émission plus grande de la charge totale transportée par le courant gazeux dans le cylindre de Faraday, du moins pour les solutions éloignées de leur point de neutralité. Pour les solutions qui donnent à peu près en même nombre des ions des deux signes, la température a une influence peu marquée.

#### Rôle des gouttelettes engendrées par la cascade.

42. Nous nous sommes proposé de rechercher si tout ou partie des charges recueillies par le cylindre de Faraday avaient comme support une gouttelette d'eau.

A cet effet nous avons refroidi le courant d'air à sa sortie du récipient d'ionisation, en le faisant passer dans un gros tube de verre en forme d'U (diamètre 3<sup>cm</sup>, longueur efficace 32<sup>cm</sup>), immergé dans un mélange de glace et de sel marin. Par ce refroidissement nous avons provoqué la congélation, sur les parois du tube, d'une partie de la vapeur d'eau et des gouttelettes microscopiques transportées par le courant gazeux. Avant d'entrer dans le cylindre de Faraday, l'air reprenait la température du laboratoire en parcourant un tube de verre d'une longueur de 1<sup>m</sup>,30.

Le graphique ci-après (*fig. 10*) représente les résultats des mesures effectuées. Les abscisses correspondent à des observations faites à 10 minutes d'intervalle; les ordonnées indiquent les charges recueillies.

On voit que, pendant le refroidissement progressif du mélange de glace et de sel, portion AB de la courbe, les charges recueillies ont diminué; elles ont été minima,

arc BC de la courbe, lorsque la température a été minima; puis elles ont augmenté pendant le réchauffement de l'eau salée jusqu'à la valeur mesurée avant la mise en place du mélange réfrigérant.

Dans ces mesures l'air n'était pas filtré, afin de réaliser le maximum de charges avec un courant d'air de faible

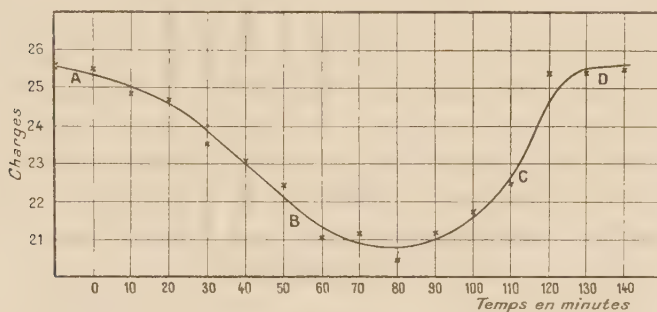


Fig. 10.

vitesse. Les irrégularités que montre le graphique sont vraisemblablement dues aux irrégularités du tirage de la trompe et aux variations du nombre de poussières *par centimètre cube d'air*.

Il semble qu'on puisse conclure de cette expérience qu'une partie au moins des charges issues de la cascade est véhiculée par des gouttelettes d'eau, que capte, par congélation sur ses parois, un tube de verre suffisamment refroidi.

#### Influence de la lumière ultraviolette.

43. En faisant entrer dans le récipient d'ionisation un faisceau de lumière ultraviolette, nous avons constaté un accroissement de la charge négative engendrée sur l'air par une cascade d'eau distillée. Quoique faible et assez irrégulier, cet accroissement a été observé dans

chacune de nos mesures comparatives; celles-ci consistaient dans l'évaluation des charges totales produites alternativement en présence et en l'absence de la chute d'eau.

Le faisceau de lumière pénétrait dans le récipient à travers une fenêtre de quartz, et passait au-dessus du disque d'écrasement des gouttes. La source lumineuse était une lampe en quartz à vapeur de mercure. En réglant convenablement la distance de la source à la fenêtre transparente et en variant la grandeur du diaphragme interposé, nous avons réussi à n'avoir, dans le récipient mouillé et en l'absence de cascade, qu'un effet Hertz négligeable vis-à-vis de l'effet à mesurer.

#### PHÉNOMÈNES SECONDAIRES.

44. Pour avoir le droit d'attribuer, ainsi que nous l'avons fait, l'électrisation de l'air à l'écrasement même du liquide contre l'obstacle conducteur, il faut être certain qu'une partie appréciable des charges mesurées n'est pas due aux phénomènes secondaires qui accompagnent le

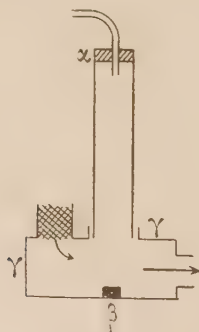


Fig. II.

phénomène principal de l'écrasement. En d'autres termes, nous devons montrer que l'air ne se charge pas (*fig. II*):

a. Au voisinage de l'orifice  $\alpha$  du tube capillaire;

*b.* Pendant le trajet  $\alpha$ ,  $\beta$  des gouttes, entre le tube capillaire et l'obstacle;

*c.* Lors des chocs des gouttelettes, rejaillies de l'obstacle, contre les parois  $\gamma$  du récipient.

*a.* En amenant l'orifice  $\alpha$  (fig. 12), à l'intérieur du récipient l'ionisation et en face de l'orifice d'aspiration,

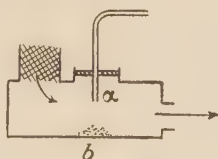


Fig. 12.

et en substituant au bouchon  $\beta$  un petit tas de coton *b*, on évite l'écrasement brusque des gouttes et l'on ne recueille aucune charge dans le cylindre de Faraday.

Même résultat si au cylindre de Faraday on substitue un condensateur permettant de recueillir des ions positifs ou des ions négatifs.

L'air au voisinage de  $\alpha$  n'est donc pas ionisé.

Cette expérience était nécessaire, car un résultat contraire au nôtre avait été annoncé <sup>(1)</sup>, dans le cas de gouttes de mercure.

*b.* En faisant tomber (fig. 13) dans l'axe d'un tube vertical  $\alpha$ ,  $\beta$  (longueur 100<sup>cm</sup>, diamètre 5<sup>cm</sup>) des gouttes d'eau distillée, recueillies par un cristalliseur *b* plein de coton, et en aspirant dans un cylindre de Faraday l'air rencontré par le liquide, nous n'avons pu déceler aucune charge sur cet air.

Même résultat en substituant au cylindre de Faraday un condensateur : la somme des ions de l'un ou l'autre

---

<sup>(1)</sup> G. REBOUL, *Applications de la théorie cinétique des métaux (Le Radium, 5<sup>e</sup> année, mai 1908, n<sup>o</sup> 5).*

signe existant dans l'air n'a pas été accrue par la chute des gouttes.

Ph. Lenard était arrivé à la même conclusion.

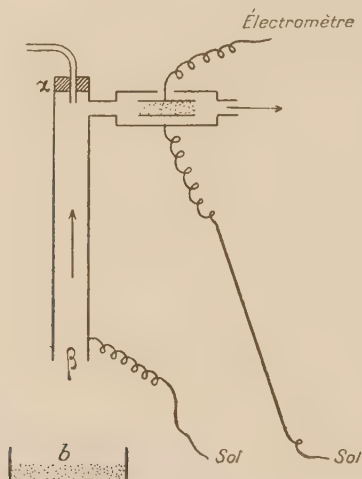


Fig. 13.

M. George C. Simpson <sup>(1)</sup> a récemment contredit l'affirmation de Lenard.

La vive critique de M. Simpson n'est pas fondée; M. Simpson provoque en effet la *pulvérisation* des gouttes en les faisant tomber dans un jet d'air ascendant d'une vitesse égale ou supérieure à 8<sup>m</sup> par seconde.

c. On peut enfin vérifier aisément que le choc, contre les parois du récipient d'ionisation, des gouttelettes rejaillies de l'obstacle n'engendre pas de charge appréciable. Il suffit de revêtir d'une couche de coton humide les parois

---

(<sup>1</sup>) George C. SIMPSON, *On the electricity of rain and its origin in thunderstorms* (Memoirs of the Indian Meteorological Departement, t. XX, part 8).

du récipient <sup>(1)</sup>, sans toucher au bouchon-obstacle.

Le fait que les gouttelettes, dans leur trajet de l'obstacle au récipient, n'ionisent pas l'air, est rendu probable par l'expérience ci-dessus (a), et est vérifié par l'expérience antérieure du disque de cuivre isolé sur un bloc de paraffine.

*En résumé*, le pied même de la cascade est le lieu où se produit le phénomène d'ionisation, et il n'y a pas de phénomène d'ionisation secondaire appréciable se superposant au phénomène de l'écrasement des gouttes.

## CHAPITRE II.

### ÉTUDE DES CHARGES CORPUSCULAIRES.

#### DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.

45. *Condensateur*. — Nous avons adopté, pour étudier les charges corpusculaires engendrées par les cascades, le même dispositif expérimental que pour la mesure des charges totales, en substituant simplement au cylindre de Faraday un condensateur cylindrique <sup>(2)</sup>.

L'armature extérieure de ce condensateur est un tube de laiton qu'on maintient à un potentiel rigoureusement constant au moyen d'une batterie d'accumulateurs. L'armature intérieure, cylindrique, recueille les charges de l'un ou de l'autre signe parmi les charges transportées par le courant d'air; elle est supportée par deux tiges fixées dans des bouchons d'ambroïde, lesquels sont assujettis dans un tube de garde au potentiel zéro.

<sup>(1)</sup> Cette expérience nous a été suggérée par la lecture du Mémoire de M. L. BLOCH, *Recherches sur les actions chimiques et l'ionisation par barbotage*, (Thèse de doctorat, Paris, 1910).

<sup>(2)</sup> Nous nous sommes servi du condensateur à gros ions de MM. Langevin et Moulin, dont une description détaillée est donnée dans *Le Radium*, 1907, p. 218 : *Électromètre enregistreur des ions de l'atmosphère*.

Les caractéristiques numériques du condensateur sont :

|                 |   |               |                 |
|-----------------|---|---------------|-----------------|
| Tube extérieur. | { | Diamètre..... | 7 <sup>cm</sup> |
|                 |   | Longueur..... | 130             |
| Électrode.....  | { | Diamètre..... | 5               |
|                 |   | Longueur..... | 120             |
| Capacité.....   |   |               | 180 U.E.S.      |

On sait qu'un condensateur cylindrique recueille tous les ions de mobilité supérieure ou égale à  $k$  si l'on a entre  $k$ , la capacité  $C$  du condensateur, son potentiel de charge  $V$  et le débit total  $\Delta$  du courant d'air qui transporte les ions, la relation

$$k \geq \frac{\Delta}{4\pi CV}.$$

Nous avons fait tourner le compteur à gaz à la vitesse de 1 tour (14<sup>1</sup>/<sub>3</sub>) en 62 secondes; nous avons pris 720 volts comme potentiel de charge du condensateur; nous avons recueilli tous les ions de mobilité supérieure ou égale à

$$1,4 \cdot 10^{-4} \text{ cm : s, volt : cm ;}$$

c'est-à-dire tous les ions de mobilité supérieure au tiers de la mobilité des gros ions de l'atmosphère.

46. *Courant de saturation.* — L'expérience nous a montré qu'en portant de 720 volts à (720 + 360) volts le potentiel de charge du condensateur, la charge recueillie par l'électrode, dans le cas d'une cascade d'eau distillée, n'était pas sensiblement accrue. *Nous avons admis* qu'avec 720 volts sur le condensateur, le courant de saturation était atteint quel que fut le liquide soumis à l'écrasement.

47. *Etalonnage.* — La charge induite dans le système isolé par un coefficient de 30 U.E.S. sous 1 daniell donne une déviation du spot mesurée par 45 divisions de

l'échelle; d'où l'on déduit qu'une division de l'échelle représente

$$2,4 \cdot 10^{-3} \text{ U. E. S. de quantité d'électricité.}$$

48. *Radiation pénétrante.* — En admettant que la production d'ions dans un vase clos dont la paroi ne semble pas contenir d'impuretés radioactives est de l'ordre de 10 ions par centimètre cube et par seconde <sup>(1)</sup>, et qu'un ion porte  $4,7 \cdot 10^{-10}$  U. E. S., on trouve que la charge due à la radiation pénétrante au cours d'une mesure peut être négligée, du moins dans la recherche de phénomènes qualitatifs.

En effet, le volume du condensateur est  $6300 \text{ cm}^3$ , celui du récipient d'ionisation de  $1600 \text{ cm}^3$ , celui du tuyautage  $800 \text{ cm}^3$ ; volume total  $8700 \text{ cm}^3$ ; la durée d'une mesure est de 3 minutes; en admettant que tous les ions dus à la radiation pénétrante restent séparés, la somme des ions de l'un ou l'autre signe serait mesurée par trois divisions de l'échelle en 3 minutes.

49. *Poussières et charges portées par l'air.* — Au cours des expériences décrites dans ce Chapitre, l'air était filtré, comme précédemment, sur  $10 \text{ cm}^3$  de coton. Nous n'avons pas obtenu de courant par convection de poussières en mettant un millier de volts sur le condensateur, ce qui semble indiquer que les  $10 \text{ cm}^3$  de coton suffisent pour arrêter les grosses poussières.

Toutefois, après son passage à travers le coton, l'air de la salle porte des charges corpusculaires de l'un et l'autre signe, sensiblement égales en valeur absolue, mesurées par des déplacements du spot variables autour de 20 divisions par minute. Le nombre d'ions correspondant

---

(1) M<sup>me</sup> CURIE, *Traité de Radioactivité*, t. II, 1910, p. 510.

est de quelques milliers (8 à 10) par centimètre cube <sup>(1)</sup>.

Nous avons constamment comparé les charges transportées par l'air lors des cascades de liquides aux charges transportées en l'absence des cascades.

#### EAU DISTILLÉE.

50. *Eau distillée du commerce.* — Nous avons vérifié, sur l'eau distillée commerciale, la majeure partie des résultats indiqués dans le Chapitre relatif à l'étude des charges totales.

La cascade a toujours eu pour effet, en heurtant un obstacle métallique, de diminuer dans une faible proportion le nombre des ions positifs transportés par l'air, et d'accroître dans une forte proportion le nombre des ions négatifs.

Voici, pour fixer les idées, les chiffres fournis par une expérience :

|                            | Ions.        |              |
|----------------------------|--------------|--------------|
|                            | positifs.    | négatifs.    |
| Air seul.....              | 21,0         | 21,5         |
| Air et cascade d'eau ..... | 18,3         | 51,5         |
| Efficacité .....           | $E_+ = 0,87$ | $E_- = 2,40$ |

51. *Efficacité d'une cascade.* — Nous appelons *efficacité d'une cascade* pour les ions de l'un ou de l'autre signe, et nous désignons par la notation  $E_+$  ou  $E_-$ , le rapport de la charge d'un certain signe, mesurée sur l'air lorsque la cascade est en marche, à la charge de même signe mesurée sur l'air en l'absence de cascade. Les rapports  $E_+$  et  $E_-$  sont essentiellement liés aux conditions

---

(1) Au cours des essais au Collège de France de l'appareil enregistreur des ions de l'atmosphère, MM. Langevin et Moulin avaient trouvé environ 100 000 poussières par centimètre cube d'air, dont 10 000 chargées.

expérimentales et en particulier au débit total d'air dans le condensateur; leur considération n'a d'autre but que de permettre une comparaison facile des résultats obtenus dans des conditions expérimentales aussi identiques que possible. Nous utiliserons ces rapports surtout dans les expériences relatives aux divers liquides que nous avons soumis à l'écrasement.

Nous dirons qu'une cascade a une efficacité unipolaire lorsqu'elle accroîtra le nombre des ions d'un seul signe parmi les ions portés par l'air.

§2. *Sur l'efficacité unipolaire de l'eau distillée.* — L'eau distillée, lorsqu'elle heurte un obstacle métallique, est bien unipolaire au sens strict de la définition que nous venons de poser.

Du fait que seul le nombre des ions négatifs mesuré est accru par la cascade, M. Kaehler, en 1903, puis M. Aselmann, en 1906, ont conclu que l'eau distillée n'engendre pas de charges positives. Il nous semble plus prudent de dire que, si des ions positifs sont engendrés par une cascade d'eau distillée, ils se recombinent, avant d'être captés par l'appareil de mesure, avec les ions négatifs engendrés en nombre beaucoup plus grand. Nous voyons diminué, par une recombinaison analogue, le nombre d'ions positifs portés par l'air.

Nous considérons comme probable la production d'ions positifs par une cascade d'eau distillée, pour les raisons suivantes :

1° En prenant comme obstacle de la laque à écailles, Lenard <sup>(1)</sup> observa une très forte charge négative de l'eau, ce qui implique l'existence, sur l'air voisin, d'une très forte charge positive <sup>(2)</sup>;

---

<sup>(1)</sup> LENARD, *loc. cit.*, p. 614, § 32.

<sup>(2)</sup> LENARD, *loc. cit.*, p. 613, § 31.

2° Dans les phénomènes de pulvérisation <sup>(1)</sup> et de barbotage <sup>(2)</sup>, certainement très voisins de ceux que nous étudions, l'eau distillée engendre des ions des deux signes, les ions négatifs en excès;

3° En produisant la cascade d'eau distillée sur de la paraffine ou sur de la cire à cacheter, nous avons recueilli quelques ions positifs, ainsi que l'indiquent les chiffres ci-après :

|                                 |              |              |
|---------------------------------|--------------|--------------|
| Cascade sur paraffine . . . . . | $E_+ = 1,06$ | $E_- = 1,05$ |
| Cascade sur cire à cacheter.    | $E_+ = 1,09$ | $E_- = 1,72$ |

Lenard avait observé qu'après avoir heurté ces mêmes obstacles, l'eau ne portait que *de toutes petites charges positives*.

#### SOLUTIONS AQUEUSES.

53. *Marche et résultats numériques des expériences.* — Parmi les produits commerciaux vendus comme purs, nous avons choisi des corps de fonctions chimiques nettement semblables ou différentes, donnant en solution aqueuse des ions mono ou polyvalents, et présentant, pour un même degré de dilution, les degrés de dissociation les plus variés.

Nous avons procédé par dédoublements successifs, en partant ou bien de solutions mères renfermant une molécule-gramme du corps pur par litre de liqueur, ou bien de solutions saturées; et nous avons étudié les variations des nombres d'ions recueillis en fonction des concentrations.

Chacune de nos observations comporte, pour une li-

---

<sup>(1)</sup> A.-S. EVE, *Ionisation by spraying* (Phil. Mag., 6<sup>e</sup> série, 1907, n° 14).

<sup>(2)</sup> DE BROGLIE, *Recherches sur les centres électrisés de faible mobilité dans les gaz* (Ann. de Chim. et de Phys., 1909).

queur donnée, et pour les ions d'un signe donné, deux séries de trois ou cinq mesures de *la charge recueillie en*

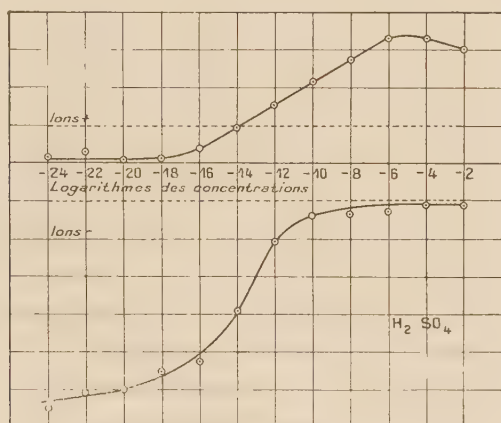


Fig. 14.

1 minute; l'une des séries se rapporte aux ions portés par l'air pendant le fonctionnement de la cascade, l'autre série se rapporte aux ions portés par l'air en l'absence de toute cascade.

Nous avons éliminé de nos recherches les liqueurs concentrées, soit qu'elles fussent capables de détériorer les parois en cuivre de nos appareils, soit que leur viscosité fut trop différente de la viscosité des solutions étendues. Des erreurs possibles, dues soit à la production d'ions par voie nettement chimique, soit à des variations notables du volume du liquide débité par unité de temps, ont été ainsi évitées.

Les résultats essentiels de nos mesures sont condensés dans les Tableaux ci-après.

A titre d'exemple, nous avons indiqué pour l'acide formique les charges recueillies sur l'air seul par unité de temps, et nous avons calculé les efficacités correspondantes des liqueurs. Dans les Tableaux qui viennent ensuite,

relatifs aux acides, aux bases et aux sels neutres, nous avons simplement inscrit les *excès* des nombres d'ions mesurés lorsque la cascade était en action sur les nombres d'ions mesurés en l'absence de cascade. Les nombres négatifs inscrits dans ces colonnes indiquent donc que la charge normalement portée par l'air, charge du signe indiqué en tête de la colonne, a été diminuée par l'effet des cascades.

Il est essentiel d'observer que les nombres inscrits dans ces Tableaux ne peuvent donner qu'une *indication quantitative* sur les phénomènes étudiés, en raison de l'impossibilité de recueillir simultanément (quatre expériences sont nécessaires) les résultats relatifs à une liqueur de concentration donnée.

| Concen-<br>trations. | Acide formique. |                      |                  |                |                      |                  |
|----------------------|-----------------|----------------------|------------------|----------------|----------------------|------------------|
|                      | Ions négatifs.  |                      |                  | Ions positifs. |                      |                  |
|                      | Air.            | H—CO <sub>2</sub> H. | E <sub>-</sub> . | Air.           | H—CO <sub>2</sub> H. | E <sub>+</sub> . |
| 2 <sup>0</sup> ....  | 16,3            | 16,3                 | 1,00             | 11,8           | 15,7                 | 1,33             |
| 2 <sup>-2</sup> .... | 17,7            | 18,3                 | 1,03             | 13,7           | 17,0                 | 1,24             |
| 2 <sup>-4</sup> .... | 18,5            | 18,7                 | 1,01             | 15,0           | 16,0                 | 1,07             |
| 2 <sup>-6</sup> .... | 17,0            | 17,7                 | 1,04             | 13,0           | 14,7                 | 1,13             |
| 2 <sup>-8</sup> .... | 17,5            | 19,0                 | 1,09             | 13,3           | 16,7                 | 1,25             |
| 2 <sup>-10</sup> ... | 18,0            | 18,5                 | 1,02             | 14,3           | 17,3                 | 1,21             |
| 2 <sup>-12</sup> ... | 16,0            | 20,0                 | 1,25             | 15,5           | 17,0                 | 1,10             |
| 2 <sup>-14</sup> ... | 17,5            | 26,3                 | 1,50             | 14,0           | 15,0                 | 1,07             |
| 2 <sup>-16</sup> ... | 18,5            | 36,0                 | 1,95             | 14,0           | 12,7                 | 0,91             |
| 2 <sup>-18</sup> ... | 20,0            | 44,5                 | 2,23             | 14,5           | 14,3                 | 0,98             |
| 2 <sup>-20</sup> ... | 19,3            | 46,3                 | 2,40             | 14,5           | 14,0                 | 0,97             |

| Concen-<br>trations. | Acide acétique. |              | Acide oxalique. |              | Acide chlorhydrique. |              |
|----------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|----------------------|--------------|
|                      | Ions<br>(+).    | Ions<br>(-). | Ions<br>(+).    | Ions<br>(-). | Ions<br>(+).         | Ions<br>(-). |
| $2^0 \dots$          | 2,0             | 0,5          | »               | 0,0          | »                    | »            |
| $2^{-2} \dots$       | 5,7             | 0,0          | »               | 0,5          | »                    | »            |
| $2^{-4} \dots$       | 11,5            | 1,0          | 2,3             | 0,5          | 4,0                  | 1,0          |
| $2^{-6} \dots$       | 5,5             | 4,0          | 2,3             | 2,0          | 3,3                  | 0,0          |
| $2^{-8} \dots$       | 6,0             | 4,0          | 3,7             | 0,7          | 4,9                  | 1,0          |
| $2^{-10} \dots$      | 2,0             | 6,7          | 6,4             | 1,8          | 4,0                  | 3,0          |
| $2^{-12} \dots$      | 0,0             | 8,3          | 4,7             | 7,3          | 2,0                  | 7,0          |
| $2^{-14} \dots$      | — 2,0           | 16,7         | 0,7             | 12,4         | — 4,0                | 16,6         |
| $2^{-16} \dots$      | — 1,5           | 27,3         | — 4,4           | 27,0         | — 3,0                | 23,2         |
| $2^{-18} \dots$      | — 2,0           | 39,3         | — 4,5           | 30,0         | — 5,0                | 28,3         |
| $2^{-20} \dots$      | — 2,0           | 41,7         | — 5,0           | 28,3         | — 6,0                | 27,7         |
| $2^{-22} \dots$      | — 2,0           | 36,5         | — 4,7           | 30,0         | — 6,0                | 26,6         |
| $2^{-24} \dots$      | »               | »            | »               | 32,5         | — 6,0                | 22,0         |

| Concen-<br>trations. | Acide sulfurique. |              | Potasse.     |              | Soude.       |              |
|----------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                      | Ions<br>(+).      | Ions<br>(-). | Ions<br>(+). | Ions<br>(-). | Ions<br>(+). | Ions<br>(-). |
| $2^0 \dots$          | »                 | »            | — 0,7        | — 2,6        | 9,3          | 0,0          |
| $2^{-2} \dots$       | 21,0              | 1,7          | — 0,7        | — 0,2        | 11,0         | — 1,7        |
| $2^{-4} \dots$       | 23,0              | 1,0          | 0,8          | 1,0          | 11,0         | — 2,0        |
| $2^{-6} \dots$       | 23,0              | 3,3          | 2,2          | 0,8          | 10,0         | — 5,3        |
| $2^{-8} \dots$       | 17,0              | 3,2          | 3,0          | 1,8          | 10,0         | — 9,0        |
| $2^{-10} \dots$      | 11,5              | 4,3          | 2,8          | 3,0          | 11,0         | — 7,0        |
| $2^{-12} \dots$      | 6,0               | 11,6         | 0,8          | 6,3          | 7,0          | — 1,0        |
| $2^{-14} \dots$      | 0,0               | 29,0         | — 2,4        | 14,5         | 3,7          | 12,7         |
| $2^{-16} \dots$      | — 6,0             | 42,7         | — 3,7        | 21,1         | 2,0          | 18,3         |
| $2^{-18} \dots$      | — 8,8             | 45,0         | — 2,8        | 24,3         | 0,3          | 21,7         |
| $2^{-20} \dots$      | — 9,8             | 50,0         | — 1,0        | 27,8         | — 4,0        | 24,0         |
| $2^{-22} \dots$      | — 7,3             | 51,5         | — 1,9        | 28,6         | — 4,0        | 31,0         |
| $2^{-24} \dots$      | — 8,0             | 55,0         | — 2,8        | 27,9         | »            | 29,7         |
| $2^{-26} \dots$      | »                 | 47,5         | »            | »            | »            | »            |

| Concen-<br>trations. | Chlorure<br>de potassium. |       | Chlorure<br>de sodium. |       | Sulfate de cuivre. |       |
|----------------------|---------------------------|-------|------------------------|-------|--------------------|-------|
|                      | Ions                      | Ions  | Ions                   | Ions  | Ions               | Ions  |
|                      | (+).                      | (-).  | (+).                   | (-).  | (+).               | (-).  |
| $2^0 \dots$          | »                         | »     | — 5,2                  | 3,5   | »                  | »     |
| $2^{-2} \dots$       | 3,0                       | — 1,3 | — 1,3                  | 2,7   | »                  | »     |
| $2^{-4} \dots$       | 3,7                       | 2,8   | 0,2                    | 4,0   | 5,8                | — 0,5 |
| $2^{-6} \dots$       | 5,7                       | 4,0   | 2,5                    | 4,7   | 10,0               | — 1,4 |
| $2^{-8} \dots$       | 2,7                       | — 0,8 | 3,3                    | 2,3   | 11,5               | — 0,4 |
| $2^{-10} \dots$      | 0,7                       | 0,0   | 4,8                    | 0,7   | 8,0                | 2,2   |
| $2^{-12} \dots$      | 1,9                       | 5,0   | 8,3                    | — 2,7 | 5,5                | 2,8   |
| $2^{-14} \dots$      | — 0,3                     | 11,3  | 14,7                   | — 0,6 | 1,0                | 5,6   |
| $2^{-16} \dots$      | — 1,2                     | 22,0  | 23,1                   | — 2,3 | — 1,2              | 9,8   |
| $2^{-18} \dots$      | — 0,2                     | 28,3  | 25,1                   | — 2,0 | — 0,2              | 21,2  |
| $2^{-20} \dots$      | — 0,2                     | 29,1  | 28,7                   | — 4,8 | — 0,7              | 19,9  |
| $2^{-22} \dots$      | — 0,5                     | 44,2  | 29,2                   | — 3,0 | — 1,0              | 20,9  |
| $2^{-24} \dots$      | — 0,5                     | 47,5  | »                      | »     | — 1,0              | »     |

| Concen-<br>trations. | Sulfate<br>de magnésie. |      | Nitrate de plomb. |      | Ferrocyanure<br>de potassium. |      |
|----------------------|-------------------------|------|-------------------|------|-------------------------------|------|
|                      | Ions                    | Ions | Ions              | Ions | Ions                          | Ions |
|                      | (+).                    | (-). | (+).              | (-). | (+).                          | (-). |
| $2^{-4} \dots$       | 3,7                     | 5,1  | 4,1               | 0,7  | 1,0                           | 0,0  |
| $2^{-6} \dots$       | 4,0                     | 3,7  | 10,9              | 0,5  | 2,0                           | 2,6  |
| $2^{-8} \dots$       | 3,3                     | 0,6  | 4,8               | 0,0  | 2,7                           | 5,3  |
| $2^{-10} \dots$      | 5,6                     | 1,0  | 3,6               | 1,2  | 3,0                           | 5,3  |
| $2^{-12} \dots$      | 3,4                     | 6,6  | 2,0               | 4,3  | 1,7                           | 5,7  |
| $2^{-14} \dots$      | 3,0                     | 11,3 | 2,3               | 15,4 | 2,0                           | 10,0 |
| $2^{-16} \dots$      | 0,4                     | 14,6 | 1,6               | 14,7 | — 1,0                         | 20,7 |
| $2^{-18} \dots$      | 1,0                     | 16,0 | 0,4               | 17,7 | — 0,3                         | 23,2 |
| $2^{-20} \dots$      | — 3,0                   | 17,0 | 0,8               | 21,5 | — 0,7                         | 26,9 |
| $2^{-22} \dots$      | — 2,3                   | 18,2 | 0,3               | 21,5 | — 1,3                         | 25,2 |
| $2^{-24} \dots$      | — 3,6                   | »    | — 0,5             | »    | »                             | »    |

### Résultats généraux.

54. Quoique d'assez nombreuses irrégularités soient apparentes parmi les chiffres successifs d'une même co-

bonne (chiffres qui mesurent les charges d'un signe donné fournies par un même volume de liqueur à des concentrations régulièrement décroissantes), les phénomènes observés présentent dans leur allure générale une marche régulière remarquable, quelle que soit la fonction chimique des corps mis en solution dans l'eau.

Nous avons étudié les acides formique, acétique, oxalique, chlorhydrique, sulfurique; les bases potasse, soude; les sels neutres chlorures de potassium, de sodium, sulfates de cuivre, de magnésie, nitrate de plomb, ferrocyanure de potassium.

Le nombre des *ions négatifs* décroît constamment lorsque la concentration de la solution augmente; cette décroissance est particulièrement rapide depuis les dilutions les plus grandes jusqu'aux concentrations voisines

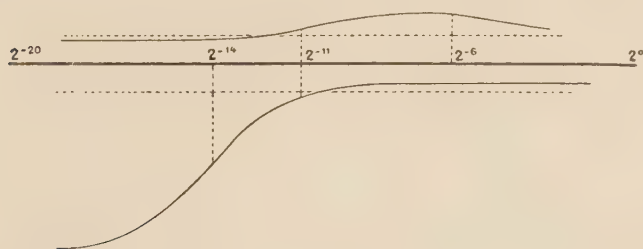


Fig. 15.

de la concentration  $2^{-12} = 10^{-3,6}$  normale; dans cette région, la courbe figurative présente un point d'inflexion d'abscisse approximative  $2^{-14} = 10^{-4,2}$ . Les liqueurs de concentration supérieure à la concentration millinormale diminuent, en général et dans une faible proportion, le nombre des ions négatifs portés par l'air.

Le nombre des *ions positifs*, inférieur pour les grandes dilutions à celui qu'on mesure sur l'air, croît d'une façon continue et très lente, passe par un maximum au voisinage de l'abscisse  $2^{-6} = 10^{-1,8}$ , puis décroît pour les liqueurs à peu près normales. Le maximum des ions positifs est en

général peu marqué, et toujours inférieur en valeur absolue au nombre d'ions négatifs fournis par des dilutions les plus grandes.

55. *Points neutres.* — En raison de l'incertitude inhérente à nos mesures, nous pouvons confondre, avec les points d'inversion ou points neutres définis par J.-J. Thomson, les points d'abscisses telles que les excès d'ions des deux signes attribuables à la cascade sur les ions des deux signes portés par l'air soient égaux. Dans le Tableau ci-après nous donnons les exposants des puissances de 10 qui fixent les concentrations correspondant aux points neutres fournis par nos observations.

L'une des colonnes se rapporte aux mesures faites au moyen du cylindre de Faraday; l'autre aux mesures faites au moyen du condensateur à gros ions.

| Solutions aqueuses.            | Cylindre<br>de Faraday. | Condensateur<br>à gros ions. |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Acide formique.....            | »                       | — 3,3                        |
| » acétique.....                | — 2,6                   | — 2,7                        |
| » oxalique.....                | »                       | — 3,3                        |
| » chlorhydrique.....           | — 2,7                   | — 3,3                        |
| » sulfurique.....              | — 3,8                   | — 3,3                        |
| Potasse.....                   | »                       | — 3,0                        |
| Soude.....                     | »                       | — 3,6                        |
| Chlorure de potassium.....     | — 2,3                   | — 3,3                        |
| » sodium.....                  | — 2,1                   | — 3,3                        |
| Sulfate de potassium.....      | — 1,6                   | »                            |
| » sodium.....                  | — 2,1                   | »                            |
| » cuivre.....                  | »                       | — 3,9                        |
| » magnésie.....                | — 2,3                   | — 3,3                        |
| Nitrate de plomb.....          | »                       | — 3,3                        |
| Ferrocyanure de potassium..... | »                       | — 2,1                        |

Les moyennes de ces nombres donnent pour les *liqueurs neutres* les concentrations  $10^{-2,6}$  normale (cylindre de Faraday) et  $10^{-3,2}$  normale (condensateur à gros ions),

avec des écarts moyens de l'exposant respectivement égaux à 0,5 et 0,3.

56. *Charges totales.* — En faisant la somme algébrique des ordonnées correspondantes à une même abscisse, on retrouve, à très peu près, les courbes précédemment obtenues par la mesure des charges totales au cylindre de Faraday. Il résulte nettement de cette remarque que les solutions salines ne donnent pas, dans les conditions expérimentales où nous nous sommes placé, des centres neutres susceptibles de se dédoubler en centres chargés lorsqu'ils arrivent entre les armatures d'un condensateur présentant une différence de potentiel suffisante. Nous avons précédemment rappelé que les effets de pareils centres neutres avaient été observés par M. Lonsdale dans les cascades de mercure.

M. de Broglie n'a pas rencontré de centres neutres jouissant de cette propriété dans ses recherches sur le barbotage des liquides.

#### LIQUIDES DIVERS.

57. Nous résumons dans le Tableau ci-après les résultats obtenus pour l'ionisation de l'air au moyen de cascades de différents liquides.

Les nombres  $E_+$  et  $E_-$  (efficacités pour les ions positifs et pour les ions négatifs), relatifs à un même corps sont aussi relatifs à un même volume de liquide débité, et par conséquent rigoureusement comparables. Au contraire, la comparaison de tous les nombres  $E_+$  entre eux, ou bien de tous les nombres  $E_-$  entre eux, ne peut donner qu'une indication qualitative sur la plus ou moins grande efficacité des différents liquides pour produire des ions d'un signe déterminé; en effet nos mesures ont été faites en recueillant les charges produites par unité de temps, et nous n'avons pu qu'atténuer grossièrement par le calcul

l'erreur résultant des différences de débit des liquides pendant l'unité de temps.

| Liquides.                                        | E <sub>+</sub> . | E <sub>-</sub> . |
|--------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Eau distillée.....                               | 0,87             | 2,40             |
| Eau d'alimentation.....                          | 1,10             | 1,10             |
| Eau de mer.....                                  | 1,13             | 1,04             |
| Alcool éthylique pur.....                        | 1,20             | 1,25             |
| Alcool à 90°.....                                | 1,19             | 1,23             |
| Alcool méthylique.....                           | 1,69             | 1,93             |
| Éther sulfurique pur.....                        | »                | »                |
| Éther sulfurique à 60°.....                      | 1,66             | 1,28             |
| Eau saturée d'éther sulfurique.....              | 0,91             | 1,50             |
| Aldéhyde formique.....                           | 1,08             | 0,99             |
| Acétone.....                                     | »                | »                |
| Aniline purifiée.....                            | 1,10             | 0,96             |
| Acétate d'amyle.....                             | 1,41             | 1,52             |
| Xylol.....                                       | 1,08             | 1,02             |
| Sulfure de carbone.....                          | »                | »                |
| Essence de térébenthine.....                     | 1,00             | 1,02             |
| Traces d'essence de térébenthine dans l'eau..... | 1,23             | 1,74             |
| Éther de pétrole à 0,700.....                    | 0,94             | 0,90             |
| Chloroforme.....                                 | »                | »                |
| Émulsion de mastic dans l'eau.....               | 1,05             | 1,14             |

Toutefois la comparaison des nombres inscrits dans une même colonne devient intéressante pour des liquides de viscosités peu différentes; par exemple : l'eau distillée, l'eau d'alimentation, l'eau de mer, l'eau saturée d'éther sulfurique, l'eau renfermant des traces d'essence de térébenthine.

§8. *Résultats généraux.* — Ces résultats suggèrent les remarques suivantes :

L'eau distillée se montre plus efficace que tout autre liquide dans la production d'ions négatifs.

L'eau d'alimentation <sup>(1)</sup> a sensiblement même efficacité pour les ions des deux signes.

---

(1) L'eau des sources de la Vanne, de composition chimique à peu près invariable, nous a donné des résultats remarquablement constants au point de vue de l'ionisation de l'air.

L'eau de mer <sup>(1)</sup> donne un faible excès d'ions positifs; ce résultat pouvait être prévu, à cause de la grande richesse de l'eau de mer en sels minéraux.

L'alcool éthylique, l'alcool méthylique, l'éther sulfurique à 65°, l'acétate d'amyle pur, se montrent plus actifs que les solutions salines de concentration normale.

L'aldéhyde formique, l'aniline, l'essence de térébenthine pure, le xylol sont très peu actifs.

L'éther de pétrole diminue les charges des deux signes portées par l'air; on peut interpréter ce résultat en admettant que l'éther de pétrole n'engendre pas d'ions et que les gouttelettes auxquelles donne naissance la cascade favorisent la recombinaison des ions d'abord présents dans l'air.

59. *Liquides à grande tension de vapeur.* — Nous n'avons pas réussi à effectuer des mesures satisfaisantes avec l'éther sulfurique pur, l'acétone, le sulfure de carbone, le chloroforme. Ces liquides ont une tension de vapeur très forte, supérieure à 200<sup>mm</sup> de mercure à la température de 25° et sous la pression atmosphérique. Lorsque, entraînées par le courant d'air, les vapeurs de ces liquides arrivent dans le condensateur à gros ions, on observe tout d'abord un brusque déplacement du spot lumineux, puis des déplacements irréguliers; lorsqu'on interrompt la chute du liquide, par un déplacement inverse du déplacement initial, mais moins rapide, le spot revient vers sa position initiale.

Les deux déplacements réguliers et de sens contraires peuvent s'expliquer par la variation de la constante diélectrique du condensateur à gros ions. On peut en effet

---

(1) Je dois à l'obligeance de M. le Dr Quinton des échantillons d'eau de mer prélevés au large du bassin d'Arcachon, par 10<sup>m</sup> de profondeur, et à l'obligeance de M. Jean Vic des échantillons prélevés au large des jetées du port de Cette.

calculer, en s'appuyant sur la propriété d'additivité des constantes diélectriques dans les mélanges (Lorentz), le pouvoir spécifique  $K$  du mélange air-vapeurs de sulfure de carbone, par exemple,  $K_1$  et  $K_2$  se rapportant respectivement aux parties constituantes du mélange, sous les pressions partielles correspondantes. La vapeur de sulfure de carbone a, à  $25^\circ$ , une tension de  $250^{\text{mm}}$  de mercure, et un pouvoir inducteur spécifique de 1,003. Le pouvoir inducteur spécifique du mélange est par suite supérieur de  $\frac{1}{1000}$  environ au pouvoir inducteur spécifique de l'air; d'où résulte une variation de  $\frac{1}{1000}$  pour la charge du condensateur, soit en U. E. S.

$$\frac{1}{1000} \frac{720^{\text{v}}}{300} \times 180^{\text{cm}} = 432 \cdot 10^{-3},$$

mesurée par

$$\frac{432 \cdot 10^{-3}}{2,4 \cdot 10^{-3}} = 180$$

divisions de l'échelle. C'est bien l'ordre de grandeur des déplacements réguliers observés.

Ces déplacements réguliers n'empêcheraient d'ailleurs pas les mesures, s'ils n'étaient pas accompagnés d'oscillations désordonnées du spot lumineux. Il semble que ces dernières puissent être attribuées à la présence de gouttelettes de vapeur condensée entre les armatures du condensateur chargées à une différence de potentiel de 720 volts, et rebondissant d'une armature à l'autre. Ces oscillations désordonnées peuvent aussi être attribuées à des défauts momentanés de l'isolement de l'armature interne du condensateur, par suite de condensations de vapeurs en gouttelettes très rapidement évaporées.

**Influence, sur la grandeur des charges  
engendrées par les chutes d'eau, des ions portés par l'air.**

60. Nous avons effectué une série de mesures comparatives des charges attribuables à une cascade d'eau dis-

tillée lorsque l'air, passant au voisinage de la chute, est au préalable, ou n'est pas, débarrassé des ions qu'il porte normalement.

A cet effet, nous nous sommes efforcé de réaliser l'étanchéité du tuyautage parcouru par le courant gazeux et de n'admettre dans le récipient d'ionisation que de l'air convenablement filtré au point de vue électrique.

Le débit du liquide soumis à l'expérience a été obtenu constant, par gouttes, et sans introduction d'air ionisé, grâce au dispositif représenté figure 16. Un robinet, réglable à volonté, permet l'arrivée du liquide dans le tube

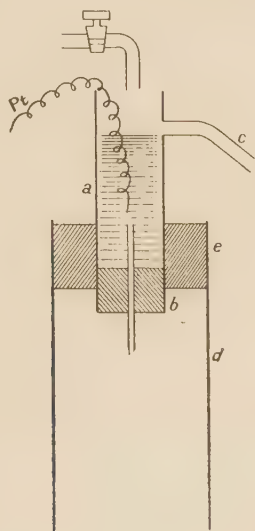


Fig. 16.

vertical *a*; l'écoulement goutte à goutte se fait, sous pression constante, grâce à la tubulure de trop plein *c*, par le tube capillaire *b*. Le gros tube *d* est vissé par une monture métallique dans le couvercle du récipient d'ionisation. Le bouchon *e* est étanche et assure le centrage de l'orifice *b* par rapport à l'obstacle contre lequel s'écrasent les gouttes.

Le filtre destiné à capter simultanément les ions des deux signes en amont de la cascade est un condensateur cylindrique de construction très simple (*fig. 17*). Les couvercles B de l'armature extérieure A se vissent dans sa paroi latérale; ils sont percés de quatre orifices circulaires C, garnis de toile métallique à mailles très serrées; l'un des couvercles porte un ajutage métallique, soudé sur ses bords, qui relie le filtre au récipient d'ionisation. Ce dernier, comme le vase d'écoulement, est au potentiel zéro. L'armature intérieure D se termine par

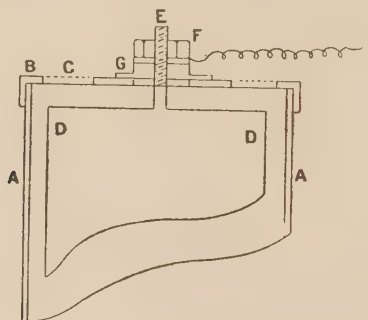


Fig. 17.

deux tiges de laiton, l'une munie d'un ressaut métallique, l'autre, E, filetée. Le ressaut et l'écrou de serrage F permettent de fixer les tiges dans les bouchons en ébène G, portés par les couvercles du cylindre extérieur. L'armature D peut être reliée, soit à l'armature chargée du condensateur à gros ions, soit au sol.

Afin d'assurer la constance du courant gazeux qui circule dans le condensateur à gros ions, nous n'avons pas intercalé de tampon de coton sur le trajet de l'air aspiré; celui-ci est donc débarrassé de ses ions, mais non de ses poussières neutres. Les toiles métalliques qui ferment les couvercles du filtre et l'entrée du récipient d'ionisation n'ont d'autre but que d'arrêter les fibres végétales ou

organiques capables de mettre en relation les armatures du condensateur de mesure.

La capacité électrique du filtre est de  $166^{\text{cm}}$ , supérieure (de  $16^{\text{cm}}$  environ) à la capacité du condensateur à gros ions. Le même courant d'air traversant le filtre et le condensateur, l'armature intérieure de ce dernier ne doit recueillir d'autre charge que celle engendrée par la chute d'eau. En réalité, nous avons toujours recueilli sur l'électrode du condensateur, en l'absence de cascade, une petite charge, due vraisemblablement à des poussières moins mobiles que les gros ions de l'atmosphère. Nos mesures comparatives ont subi de ce fait une correction.

La chute d'eau dans l'air débarrassé de ses ions s'est montrée strictement unipolaire, comme dans les expériences antérieures, et plus efficace que dans l'air non filtré.

### CHAPITRE III.

#### INTERPRÉTATION DES FAITS OBSERVÉS.

##### ANALOGIES DE PHÉNOMÈNES.

61. Plusieurs expérimentateurs ont déjà signalé la grande analogie du phénomène d'ionisation des gaz par voie d'écrasement de gouttes liquides contre un obstacle, par voie de barbotage et par voie de pulvérisation :

Le liquide s'électrise; le courant gazeux transporte une charge totale égale et de signe contraire à celle du liquide;

Les mobilités des charges sont faibles;

La grandeur des charges varie avec la nature du liquide; les liquides ionisants au point de vue électrolytique, et par conséquent de pouvoir inducteur spécifique élevé, semblent être les plus actifs, c'est-à-dire ceux qui fournissent au courant gazeux les plus grandes charges positives ou négatives.

Nos expériences nous permettent de pousser plus loin cette analogie.

Nous avons en effet constaté que, pour que l'écrasement des gouttes donne une charge au courant gazeux, il est nécessaire que cet écrasement soit accompagné, ou bien d'une pulvérisation apparente du liquide, ou bien d'une agitation apparente de bulles gazeuses au sein du liquide (barbotage).

Nous avons constaté une diminution progressive des charges négatives transportées par le courant gazeux lorsque, partant de l'eau distillée, on dissolvait dans cette eau des acides, des bases ou des sels en quantités progressivement croissantes. La variation du courant de saturation est particulièrement brusque au voisinage des concentrations de l'ordre  $10^{-4}$  normales. M. de Broglie a fait la même remarque dans son étude de l'ionisation des gaz par barbotage des solutions aqueuses. Il y a là un rapprochement qualitatif qui présente un certain degré de précision.

Nous avons comparé quantitativement le phénomène des cascades et le phénomène de pulvérisation, en mesurant les charges négatives fournies par un même volume d'eau distillée. La quantité d'eau pulvérisée était mesurée, au moyen d'une balance de Curie, par pesées du pulvérisateur. Nous avons obtenu par pulvérisation directe des charges environ 25 fois plus grandes que celles obtenues par l'écrasement des gouttes.

Nous avons enfin montré que la température était un facteur important, du moins pour les solutions éloignées de leur point de neutralité, dans le cas du barbotage comme dans le cas des cascades.

62. Les phénomènes d'ionisation par cascade, barbotage ou pulvérisation présentent cependant des différences bien marquées.

L'eau distillée, unipolaire par cascade, donne des ions des deux signes par barbotage et par pulvérisation ;

Le mercure, très actif par cascade, est inactif par barbotage et par pulvérisation ;

Les solutions salines aqueuses ne donnent, par cascade, que peu d'ions positifs, et encore faut-il que leur concentration soit notable ; au contraire, par barbotage, elles donnent un grand nombre d'ions positifs lorsque leur concentration est faible.

63. M. L. Bloch a montré que les mobilités des ions obtenus par barbotage décroissent lorsque la concentration de la solution croît. On pourrait admettre que, dans les expériences relatives aux cascades, on ne recueille d'ions positifs que lorsque leurs mobilités sont assez faibles pour qu'ils puissent ne pas disparaître par recombinaison avant d'atteindre le condensateur. Ainsi pourrait s'expliquer, dans les phénomènes que nous avons étudiés, l'absence d'ions positifs jusqu'à ce que soient assez notables les concentrations des solutions ; l'analogie des cascades et du barbotage serait conservée.

64. Quant à l'anomalie présentée par la grande activité du mercure relativement à l'eau (le rapport des activités est de 15 environ), elle peut s'expliquer par une hypothèse qui nous paraît jusqu'à un certain point légitime : *les effets d'ionisation observés pour un liquide donné seraient liés à l'intensité de la pulvérisation subie par ce liquide.*

Nous avons en effet montré qu'une cascade d'eau distillée est d'autant plus active que la force vive de la goutte, lors de son arrivée au point d'écrasement, est plus considérable, et qu'une pareille cascade est moins active qu'une pulvérisation proprement dite. M. Lonsdale a montré que le mercure, strictement unipolaire pour de faibles hauteurs de chute, donne des ions des deux signes

pour une hauteur de chute suffisante. M. L. Bloch a montré que la benzine, l'essence minérale, l'essence de térébenthine, l'huile de vaseline pure, inactives par barbotage, sont actives par pulvérisation.

L'écrasement des gouttes serait, en général, le mode de pulvérisation le moins intense et le moins efficace; le barbotage viendrait ensuite; puis la pulvérisation proprement dite. Pour le mercure, en raison de son poids spécifique élevé, la classification ci-dessus des trois modes de pulvérisation serait inversée.

La grandeur de la pulvérisation jouerait ainsi un rôle analogue à celui que joue la grandeur de la température dans l'émission de charges électriques par les sels chauffés et par les métaux incandescents.

#### SUR LES THÉORIES DE L'IONISATION PAR PULVÉRISATION.

65. On peut donc admettre qu'une explication satisfaisante de l'ionisation par les cascades serait aussi une explication satisfaisante de l'ionisation par barbotage et par pulvérisation. Dans ces trois modes d'ionisation il y a passage brusque d'une masse d'air au sein d'une masse liquide et formation violente de gouttelettes liquides. Il semble que la cause de la production des charges électriques doive être cherchée soit dans les phénomènes de contact du gaz et du liquide, soit dans la séparation brusque d'une masse liquide en gouttelettes.

Une explication fondée sur le contact des gaz et des liquides rapprocherait les phénomènes visés de tous ceux qu'englobe la théorie de Nernst; elle pourrait invoquer les différences de potentiel de contact, et par conséquent la présence d'une couche double d'électricité (Ph. Lenard) ou d'une couche de gaz ionisé (J.-J. Thomson), au contact gaz-liquide. Les charges observées seraient alors de véritables ions, ions gazeux ou ions électrolytiques.

Une explication fondée sur la formation violente de gouttelettes liquides à partir d'une masse liquide initiale ramènerait les phénomènes visés à ceux d'électrisation par frottement, et les rapprocherait tout particulièrement des curieuses propriétés observées dans le clivage du mica, du talc feuilleté, du gypse, etc. Les supports matériels des charges seraient alors des gouttelettes liquides.

Nous ne pouvons choisir entre ces deux genres d'explication, puisque nous ignorons la nature des supports matériels des charges observées.

Toute théorie nous semble d'ailleurs devoir rendre compte des variations des courants de saturation en fonction de la concentration saline du liquide expérimenté. Nos connaissances actuelles des solutions aqueuses nous semblent trop peu étendues pour qu'une explication, provisoirement satisfaisante, soit aisée à formuler. Nous sommes à peu près renseignés sur les tensions de vapeur et les constantes capillaires des solutions, moins bien renseignés sur les dissociations électrolytiques ; mais nous ne savons à peu près rien des différences de potentiel, même apparentes, aux contacts liquides-gaz, et nous ignorons totalement, du moins au point de vue expérimental, la relation des pouvoirs inducteurs spécifiques et des concentrations.

## CHAPITRE IV.

### DÉFORMATION DES SURFACES LIQUIDES. ÉVAPORATION.

#### DÉFORMATION DES SURFACES LIQUIDES.

66. Nous nous sommes proposé de rechercher si la simple déformation superficielle d'une masse d'eau est capable de faire apparaître dans l'air ambiant des charges électriques.

Parmi les expériences précédemment décrites, il en est

quelques-unes qui apportent une réponse à cette question.

a. Il y a en effet déformation d'une surface liquide lorsqu'une goutte se forme à l'extrémité d'un tube effilé; et dans ce cas nous n'avons pu déceler (§ 44, a) l'apparition, sur l'air passant au voisinage du tube, d'aucune charge d'électricité.

b. Des gouttes qui tombent dans l'air sont animées de vibrations complexes et rapides, et elles subissent en conséquence des déformations importantes. Dans ce cas encore le courant d'air ne nous a révélé (§ 44, b) aucune charge due à ces déformations.

c. Lorsque des gouttes d'eau tombent d'une faible hauteur sur un obstacle rigide d'étendue notable, le liquide s'accumule, formant une plage d'eau qui s'étend peu à peu jusqu'aux bords de l'obstacle; chaque goutte qui vient accroître le volume de la petite masse d'eau provoque une déformation importante de sa surface. Or, nous avons vu que l'étendue de l'obstacle était sans effet sur la grandeur de la charge recueillie (§ 32), et qu'il n'y avait de charge recueillie que si un barbotage ou une pulvérisation était visible.

Nous avons amplifié les déformations superficielles par les procédés suivants, qui nous ont conduit au même résultat négatif :

d. Un filet d'eau distillée a été amené, par un tube étroit, au contact d'une large cuvette en laiton nickelé occupant le fond du récipient d'ionisation (*fig. 18*). Une surface liquide constamment renouvelée était ainsi exposée au courant d'air dirigé vers le condensateur de mesure.

e. Un renouvellement analogue des surfaces de contact air-eau a été réalisé en faisant tourner dans une boîte en laiton, où circulait le courant gazeux, un disque métallique à moitié immergé dans de l'eau distillée (*fig. 19*).

f. Nous avons enfin produit des ondes capillaires à la surface d'une couche d'eau distillée en amenant par un tube fin (fig. 20) un filet d'air au voisinage de cette sur-

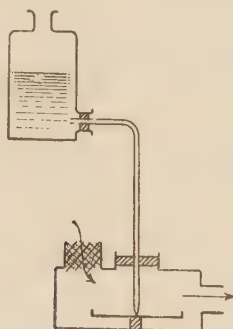


Fig. 18.

face; dans ces conditions le courant gazeux n'apportait pas d'autres charges au condensateur que celles qu'il transportait en l'absence de la surface liquide. Au contraire, dès que le tube était enfoncé dans l'eau, il y avait

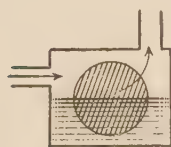


Fig. 19.

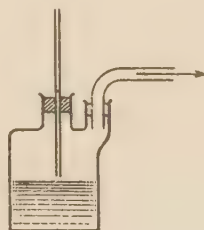


Fig. 20.

barbotage, et le courant d'air transportait de plus grandes charges.

Ces diverses expériences nous permettent de conclure que la simple déformation d'une surface liquide au contact d'un gaz et aussi le renouvellement continu de cette

surface, sont incapables d'ioniser le gaz. Et il semble qu'on puisse dire avec M. L. Bloch <sup>(1)</sup> que la rupture brusque d'une surface liquide est nécessaire pour ioniser le gaz en contact avec elle. M. E. Salles avait été amené à la même conclusion par une série d'expériences faites au Collège de France et qu'il n'a pas publiées.

67. La substitution d'eau de mer à l'eau distillée n'a pas changé le résultat des expériences ci-dessus. D'où cette conséquence que la propagation de la houle à la surface des océans ne doit pas être considérée comme l'un des facteurs capables d'entretenir la charge négative de la Terre. L'opinion contraire est assez répandue <sup>(2)</sup>.

#### ÉVAPORATION DES LIQUIDES NON ÉLECTRISÉS.

68. Les expériences ci-dessus, dans lesquelles l'évaporation normale est accélérée par le passage du courant gazeux et aussi par l'accroissement de surface dû à la formation des gouttes ou à la propagation d'ondes superficielles, montrent encore que l'évaporation n'est pas une source d'électricité.

#### ÉVAPORATION DES LIQUIDES ÉLECTRISÉS.

69. L'évaporation de liquides divers, maintenus à un potentiel constant au fond du récipient d'ionisation, ne nous a pas révélé de transport de charges par les vapeurs de ces liquides. Nous avons essayé successivement de l'eau distillée, de l'eau de mer, de l'alcool, de l'essence de térébenthine; les différences de potentiel entre la cuvette en laiton nickelé et le récipient d'ionisation ont

---

<sup>(1)</sup> L. BLOCH, *Thèse de Doctorat*, Paris, 1910.

<sup>(2)</sup> J.-J. THOMSON, *Conduction of electricity through gases*, 1903.

été échelonnées entre  $\pm 1$  volt et  $\pm 800$  volts; le champ électrique dans lequel se produisait l'évaporation a été compris entre 0,3 volt et 260 volts par centimètre.

On ne saurait donc admettre que les vapeurs qui s'élèvent du sol ou des mers transportent dans l'atmosphère une partie de la charge négative de la Terre.

Des expériences récentes du professeur Millikan <sup>(1)</sup> montrent que des *gouttelettes* liquides s'évaporent sans perdre leur charge. Ce physicien a en effet pu suivre au microscope, pendant 3 heures 30 minutes, une gouttelette, isolée et maintenue entre les armatures d'un condensateur, portant 37 corpuscules négatifs; la perte, par suite de l'évaporation, d'un seul atome d'électricité eût été aisément observée.

## CHAPITRE V.

### SUR LES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES QUI ACCOMPAGNENT LA PLUIE.

#### ORIGINE DES CHARGES TRANSPORTÉES PAR LA PLUIE.

##### I.

##### Grandeur des charges.

70. Les charges transportées jusqu'au voisinage du sol par les pluies, d'ailleurs de signes variables, sont d'un ordre de grandeur nettement différent de celui que nous avons obtenu dans l'étude de l'écrasement des gouttes d'eau distillée contre un obstacle rigide et contre une couche d'eau. Elster et Geitel <sup>(2)</sup> à Volfenbüttel, Ger-

---

<sup>(1)</sup> R.-A. MILLIKAN, *The isolation of an ion, a precision measurement of its charge, and the connection of Stoke's law* (*The Phys. Review*, Vol. XXXII, avril 1911, n° 4).

<sup>(2)</sup> ELSTER et GEITEL, *Wien. Ber.*, t. XCIX, 1890, p. 421.

dien <sup>(1)</sup> à Göttingue, Weiss <sup>(2)</sup> à Vienne, Kaehler <sup>(3)</sup> à Potsdam, Simpson <sup>(4)</sup> à Simla, Baldit <sup>(5)</sup> au Puy-en-Velay, ont mesuré, par centimètre cube d'eau météorique, des charges très fréquemment voisines <sup>(6)</sup> de une ou deux unités électrostatiques C. G. S.

Il semble que, par temps orageux, la charge par centimètre cube d'eau peut être beaucoup plus considérable; elle atteindrait exceptionnellement 20 unités d'après Kaehler et Simpson, et même 35 et 40 unités d'après Weiss et Kaehler. Tout récemment, M. A. Baldit a observé 43,6 unités comme charge négative maxima et 26,7 comme charge positive maxima; il estime qu'« on trouvera probablement des charges *plus grandes encore* ».

71. Nous avons surtout en vue, dans ce qui suit, l'étude de l'origine des charges des pluies dites *cycloniques*, qui correspondent à des situations météorologiques actuellement assez bien connues (dépressions). Nos conclusions ne porteront donc pas sur les pluies qui présentent vraisemblablement des anomalies dans l'origine de leur charge en raison des facteurs météorologiques exceptionnels qui les accompagnent.

## II.

Sur la théorie de la pulvérisation des gouttes de pluie.

72. Il ne nous paraît pas possible d'admettre que la pulvérisation des gouttes de pluie, au cours de leur chute

<sup>(1)</sup> GERDIEN, *Phys. Zeitschr.*, t. IV, 1903, p. 837.

<sup>(2)</sup> WEISS, *Wien. Ber.*, t. CXV, 1906, p. 1825.

<sup>(3)</sup> KAEHLER, *Public. de l'Institut Météor. de Prusse*, 1909, n° 213.

<sup>(4)</sup> SIMPSON, *On the electricity of rain and its origin in thunderstorms* (*Memoirs of the Indian Meteor. Depart.*, Vol. XX, part 8).

<sup>(5)</sup> A. BALDIT, *C. R. Acad. Sc. Paris*, 1<sup>er</sup> semestre 1911, p. 807; *Le Radium*, t. IX, fasc. 3, mars 1912.

<sup>(6)</sup> Voir pour plus de détails : A.-B. CHAUVEAU, *Le Radium*, t. VIII, fasc. 4, avril 1911.

dans l'atmosphère, soit capable de donner à ces gouttes des charges de l'ordre de grandeur le plus fréquemment observé.

Et cela pour deux raisons :

En premier lieu, la pulvérisation, qui a pour effet de charger l'eau positivement, ne peut pas expliquer les pluies négatives.

En second lieu, il ne se produit pas dans l'atmosphère, sauf *peut-être* dans des circonstances tout à fait exceptionnelles, une pulvérisation des gouttes de pluie comparable à celle qu'on peut observer en laissant tomber des grosses gouttes d'eau contre un courant d'air ascen-

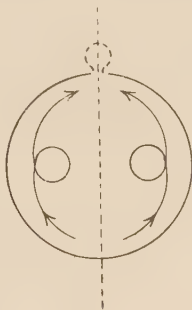


Fig. 21.

dant animé d'une vitesse de 8<sup>m</sup> par seconde. Dans l'expérience de laboratoire, les gouttes subissent, lors de leur rencontre avec le jet d'air, une brusque contre-accélération qui provoque leur rupture en fragments nombreux. Dans l'atmosphère, au contraire, l'accélération retardatrice est progressivement croissante; elle fait naître au sein de la goutte des frottements intérieurs <sup>(1)</sup>, symétriques par rapport au diamètre vertical, et qui ont pour dernière conséquence un afflux de liquide vers ce dia-

<sup>(1)</sup> Ph. LENARD, *Met. Zeitsch.*, t. XXXIX, 1904, p. 249. — J. PERRIN, *Cours oral* de la Faculté des Sciences de Paris, en 1910.

mètre, d'où la formation, d'après des expériences effectuées par M. H. Ollivier <sup>(1)</sup>, puis l'arrachement d'une goutte satellite.

73. Il est très facile de réaliser dans un laboratoire de pareilles gouttes satellites et de les observer dans des conditions satisfaisantes d'éclairement. L'application des diverses formules usuelles relatives à la résistance de l'air <sup>(2)</sup> montre que les gouttes satellites se détachent des gouttes initiales bien avant que celles-ci aient atteint leur vitesse limite voisine de 8<sup>m</sup> par seconde.

Dans l'atmosphère, les gouttes satellites sont en général rattrapées par des gouttes plus grosses, qui, à leur tour, émettent des gouttes satellites.

74. Tels sont les seuls faits de pulvérisation des gouttes de pluie, du moins dans les conditions normales de l'air, vérifiées par l'expérience <sup>(3)</sup>.

Or nous savons que la grandeur des effets d'ionisation par la pulvérisation des liquides varie dans le même sens que l'intensité de la pulvérisation. Par suite, la pulvérisation des gouttes de pluie ne saurait expliquer la grandeur des charges transportées par les eaux météoriques.

La formation de gouttes satellites ne peut accroître que dans une très faible proportion la charge d'une pluie positive.

75. Dans la discussion qui précède, nous avons assimilé les eaux météoriques à de l'eau distillée; cette assimilation

<sup>(1)</sup> H. OLLIVIER, *Recherches sur la capillarité* (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 8<sup>e</sup> série, t. X, 1907).

<sup>(2)</sup> On peut, par exemple, appliquer la formule  $V = 222^m,31 \sqrt{r}$ ,  $r$  rayon de la goutte de l'ordre du millimètre.

<sup>(3)</sup> Expériences de Ch. Ritter, citées par J.-R. Plumandon, *Les orages et la grêle*, Paris, Gauthier-Villars.

constitue une hypothèse légitime, parce qu'elle est favorable à une plus grande intensité des phénomènes d'ionisation par pulvérisation; la présence de sels ammoniacaux dans l'eau distillée diminue en effet le nombre d'ions obtenus par pulvérisation.

### III.

#### Sur la théorie de Wilson-Gerdien.

76. En répétant les expériences de C.-T.-R. Wilson <sup>(1)</sup> sur la condensation de la vapeur d'eau par les ions ordinaires, J.-J. Thomson <sup>(2)</sup>, fut conduit à formuler l'hypothèse suivante sur l'origine de l'électricité atmosphérique : « Si les ions négatifs, par exemple, différaient des positifs dans leur propriété de condenser la vapeur d'eau, nous pourrions obtenir un nuage formé autour d'une seule espèce d'ions. Les ions sur lesquels s'est produit le nuage tomberaient alors sous l'action de la pesanteur, et nous pourrions ainsi obtenir la séparation des ions positifs et négatifs et la production d'un champ électrique, le travail nécessaire pour la création de ce champ étant fourni par la gravitation ».

Invité par le *Meteorological Council* à étudier la relation entre la pluie et l'électricité atmosphérique, C.-T.-R. Wilson <sup>(3)</sup> démontra l'inégale efficacité des ions des deux signes comme centres de condensation, pour un degré de détente donné.

Gerdien <sup>(4)</sup> reprit et développa les idées de J.-J.

<sup>(1)</sup> C.-T.-R. WILSON, *Phil. Trans.*, A, t. CLXXXIV, 1897, p. 265.

<sup>(2)</sup> J.-J. THOMSON, *Phil. Mag.*, t. XLVI, décembre 1898, p. 533.

<sup>(3)</sup> C.-T.-R. WILSON, *Phil. Trans.*, A t. CXCI, 1899, p. 289, à 303.

<sup>(4)</sup> H. GERDIEN, nombreux Mémoires dans le *Physik. Zeitsch.* de 1903 à 1905.

Thomson et de C.-T.-R. Wilson, en s'appuyant sur ses propres recherches expérimentales et en invoquant le transport des charges électriques, par les courants généraux de l'atmosphère, dans les régions non pluvieuses. Son explication de l'entretien du champ électrique terrestre par l'apport négatif des pluies est incompatible avec les faits d'observation.

Une explication, non plus de l'existence du champ électrique terrestre, mais de l'origine des charges de la pluie a été construite d'après les travaux de Wilson et de Gerdien. En tenant compte de la présence dans l'atmosphère des gros ions découverts par Langevin <sup>(1)</sup>, on peut donner à la théorie dite de *Wilson-Gerdien* la forme suivante :

77. « Les gros ions <sup>(2)</sup>, et les particules neutres dont ils impliquent la présence, jouent un rôle essentiel dans la formation des couches inférieures des nuages (stratus et cumulus entre 1000<sup>m</sup> et 2000<sup>m</sup> d'altitude). Ces particules, en effet, condensent la vapeur d'eau à peine sursaturante, et quand une masse d'air humide s'élève et se refroidit par détente adiabatique, c'est sur elles tout d'abord que les gouttes se forment ». Ces gouttes « cessent <sup>(3)</sup> de s'élever lorsqu'une grosseur critique est atteinte, qui dépend de la vitesse d'ascension du courant d'air. La sursaturation peut ainsi se produire dans l'air qui a laissé au-dessous de lui ses particules de poussière » et ses gros ions, « et si le courant ascendant atteint une hauteur suffisante, une seconde condensation pourra se produire sur les » petits « ions, à un niveau plus élevé que celui des pre-

---

(1) P. LANGEVIN, *C. R. Acad. Sc.*, t. CXL, 1905, p. 232.

(2) LANGEVIN et MOULIN, *Electromètre enregistreur des ions de l'atmosphère (Le Radium)*, 1907, p. 218).

(3) C.-T.-R. WILSON, *Ions, électrons, corpuscules*, t. II, Note ajoutée le 25 septembre 1899.

miers nuages ». En raison de la plus grande sursaturation nécessaire pour la condensation sur les ions positifs, « ce doivent être principalement ou uniquement les ions négatifs » qui agissent comme centres de condensation, « de sorte qu'un excès de charges négatives se trouvera apporté au sol par les pluies ».

78. Avant de discuter cette théorie, dont le point de départ réside dans les expériences de condensation du genre Wilson, nous examinerons quels renseignements ces expériences nous peuvent donner sur la constitution des brouillards ou des pluies qu'elles manifestent.

79. *Brouillards artificiels formés par détente de l'air humide en présence de petits ions.* — J.-J. Thomson <sup>(1)</sup> attribua aux gouttelettes d'eau condensée, qu'il obtint en perfectionnant la méthode de recherches de C.-T.-R. Wilson, la masse

$$\mu = 1,63 \cdot 10^{-10}.$$

Le nombre de gouttelettes nécessaires pour former 1<sup>cm</sup><sup>3</sup> d'eau est  $\frac{1}{\mu}$  ; en adoptant pour l'atome d'électricité le nombre résultant des déterminations de J. Perrin <sup>(2)</sup>

$$e = 4,2 \cdot 10^{-10},$$

on calcule par centimètre cube d'eau de condensation la charge

$$\frac{e}{\mu} = 2,6 \text{ U. E. S.},$$

dans l'hypothèse où chaque gouttelette est chargée d'un corpuscule.

<sup>(1)</sup> J.-J. THOMSON, *On the charge of electricity carried by the ions produced by Roentgen rays* (*Phil. Mag.*, 5<sup>e</sup> série, t. XLV, 1898, p. 541).

<sup>(2)</sup> J. PERRIN, *C. R. Acad. Sci.*, t. CLII, 1911, p. 1168 et 1382.

80. Des expériences du même genre furent faites par Harold A. Wilson <sup>(1)</sup>. Ce physicien fut conduit à admettre que les plus nombreuses, parmi les trois espèces de gouttelettes observées, portaient une seule charge corpusculaire.

On calcule pour ces gouttelettes les plus nombreuses, d'après les chiffres du Mémoire original, une masse moyenne

$$\mu = 1,4 \cdot 10^{-11};$$

d'où, pour  $1^{\text{cm}^3}$  d'eau provenant de ces gouttelettes, la charge totale

$$\frac{e}{\mu} = 30 \text{ U. E. S.}$$

H.-A. Wilson attribua aux gouttelettes des deux autres espèces, tombant, dans un champ électrique donné, respectivement 2 et 3 fois plus vite que les gouttelettes du premier groupe, la même masse  $\mu$  qu'à ces dernières et des charges respectivement égales à  $2e$  et  $3e$ .

Par suite,  $1^{\text{cm}^3}$  d'eau, formé par la condensation d'un brouillard renfermant des gouttelettes des trois espèces, donnerait une charge de l'ordre de

$$50 \text{ U. E. S.}$$

81. *Expériences de Millikan.* — Les expériences de Millikan <sup>(2)</sup>, entreprises comme les précédentes en vue de la détermination de la valeur de  $e$ , permettent aussi de calculer la charge portée par  $1^{\text{cm}^3}$  d'eau. En raison du soin et de la précision avec lesquels ces expériences ont été conduites, nous rappellerons leur principe et nous développerons les remarques qu'elles nous ont suggérées.

<sup>(1)</sup> H.-A. WILSON, *Phil. Mag.*, 6<sup>e</sup> série, t. V, 1903, p. 429-441.

<sup>(2)</sup> R.-A. MILLIKAN, *A new modification of the cloud method of determining the elementary electrical charge and the most probable value of that charge* (*Phil. Mag.*, t. XIX, n<sup>o</sup> 110, february 1910, p. 209).

Millikan utilise les équations de H.-A. Wilson,

$$\begin{aligned}\frac{\nu_1}{\nu_2} &= \frac{\mu g}{\mu g + X\varepsilon}, \\ \nu_1 &= \frac{2}{9} \frac{ga^2d}{\zeta}, \\ \mu &= \frac{4}{3} \pi a^3,\end{aligned}$$

dans lesquelles  $\varepsilon$  est la charge portée par une goutte de masse  $\mu$ , de rayon  $a$ , de densité  $d$ , tombant dans un milieu de viscosité  $\zeta$  où règne un champ électrique uniforme de grandeur  $X$  (en unités électrostatiques);  $g$  est l'accélération due à la pesanteur; sous l'action de la gravité seule, la goutte prend la vitesse de chute  $\nu_1$ ; sous l'action combinée de la gravité et du champ électrique, la goutte prend a vitesse  $\nu_2$ .

Ces équations donnent

$$\varepsilon = \left[ \frac{4}{3} \pi \left( \frac{9\zeta}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \frac{g}{X} \frac{(\nu_2 - \nu_1) \nu_1^{\frac{1}{2}}}{d^{\frac{1}{2}}}.$$

Millikan mesure directement la viscosité  $\zeta$  dans les conditions de ses expériences (air saturé de vapeur d'eau à la température de 26° C.), d'où il déduit pour le terme entre crochets la valeur

$$3,422 \cdot 10^{-9}.$$

Il fait varier le champ  $X$  et le degré de détente de façon que

$$\mu g + X\varepsilon = 0.$$

Cette condition est réalisée lorsque la goutte, observée au microscope, paraît immobile. Alors  $\nu_2 = 0$ ; et, en admettant  $d = 1$ , la charge portée par la goutte est donnée par l'équation

$$\varepsilon = 3,422 \cdot 10^{-9} \frac{g}{X} \nu_1^{\frac{3}{2}},$$

X étant de sens contraire à la direction de la pesanteur.

Trois séries d'expériences fournissent à Millikan les résultats moyens :

$$\begin{aligned} X_1 &= 14,14, & \epsilon_1 &= 13,77 \cdot 10^{-10}, \\ X_2 &= 14,46, & \epsilon_2 &= 24,14 \cdot 10^{-10}, \\ X_3 &= 14,64, & \epsilon_3 &= 28,16 \cdot 10^{-10}; \end{aligned}$$

d'où il conclut,  $e$  désignant la charge corpusculaire,

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= 3e \\ \epsilon_2 &= 5e \\ \epsilon_3 &= 6e \end{aligned} \right\} e = 4,7 \cdot 10^{-10}.$$

82. Au lieu de terminer le calcul comme le fait Millikan, nous pouvons de ses données expérimentales déduire les masses  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  des gouttelettes d'eau portant respectivement les charges  $3e, 5e, 6e$ . Il suffit d'appliquer la relation

$$\mu g = X \epsilon.$$

En substituant à X et à  $\epsilon$  les trois groupes de valeurs ci-dessus, et en posant

$$g = 980,3$$

(accélération due à la pesanteur à Chicago), on trouve

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 1,99 \cdot 10^{-10}, \\ \mu_2 &= 3,56 \cdot 10^{-10}, \\ \mu_3 &= 4,21 \cdot 10^{-10}. \end{aligned}$$

Ces masses sont, à quelques centièmes près, respectivement égales à  $3\mu, 5\mu$  et  $6\mu$ , en posant

$$\mu = 6,97 \cdot 10^{-11}.$$

D'où la charge portée par  $1\text{ cm}^3$  d'eau condensée

$$\frac{e}{\mu} = 6,74 \text{ U. E. S.}$$

83. Les trois groupes de recherches que nous venons d'examiner donnent donc par centimètre cube d'eau de condensation une charge de l'ordre de grandeur des charges transportées par les eaux météoriques.

84. Un autre renseignement sur les brouillards artificiels nous est fourni par les expériences ci-dessus rappelées de H.-A. Wilson et de Millikan.

Wilson observa qu'au bout de quelques secondes, et sous l'influence d'un champ électrique appliqué de l'extérieur, la surface du brouillard commence à se diviser en deux parties, l'une des parties tombant visiblement plus vite que l'autre. Quelquefois même, trois divisions nettes du nuage se produisent. Wilson fut ainsi conduit à admettre l'existence de trois espèces de gouttelettes, toutes de même grosseur, mais de charges différentes.

Millikan put suivre au microscope des gouttelettes de grosseurs différentes et portant des charges électriques différentes.

De plus Millikan observa directement que les gouttelettes les plus grosses et le plus fortement chargées sont aussi celles qui s'évaporent le plus lentement. On sait que Helmholtz <sup>(1)</sup>, Lord Rayleigh <sup>(2)</sup>, J.-J. Thomson <sup>(3)</sup> et Langevin <sup>(4)</sup> sont arrivés par des voies différentes à des conclusions qui s'accordent pour assigner à la tension superficielle et à la pression électrostatique des fonctions opposées dans l'équilibre des gouttes chargées; en tendant à réduire la surface, et par suite le volume de la goutte-

(1) HELMHOLTZ, *Studien über elektrische Greeschichten* (Ann. der Phys. und Ch., t. VII, p. 337).

(2) LORD RAYLEIGH, *Équilibre d'une surface liquide conductrice électrisée* (Assoc. britann., Southampton, août 1882).

(3) J.-J. THOMSON, *Application of Thermodynamics to Physic and Chemistry*.

(4) Eugène BLOCH, *Thèse de Doctorat*, Paris, 1904.

lette, la tension superficielle provoque l'évaporation; la pression électrostatique, en abaissant la tension de vapeur nécessaire à l'équilibre, tend à empêcher l'évaporation. De là résulte immédiatement que si deux gouttes de masses  $\mu$  et  $p\mu$  portent des charges  $\varepsilon$  et  $p\varepsilon$ , la plus grosse des gouttes est la plus stable. En effet, les pressions électrostatiques à la surface de ces gouttes sont entre elles comme 1 et  $p^{\frac{2}{3}}$ ; si donc la tension superficielle est indépendante de la charge portée par le liquide, hypothèse généralement admise, et si la tension superficielle est la même pour les deux gouttes considérées, hypothèse légitime étant donnée leur grosseur, la plus grosse goutte doit être la plus stable. C'est ce que confirme l'expérience de Millikan.

85. *Critique de la théorie Wilson-Gerdien.* — Il n'est pas douteux que les poussières et les gros ions puissent servir de noyaux de condensation à la vapeur d'eau à peine sursaturante. La formation de nuages (stratus ou cumulus) par condensation sur les poussières ou les gros ions est donc parfaitement admissible. Si une détente faible est nécessaire à cette condensation, on peut l'expliquer dans l'atmosphère : soit par les courants de convection dus aux inégalités de température entre deux régions voisines, soit par les mélanges de masses d'air à des températures et à des degrés hygrométriques différents.

86. Mais, d'autre part, la présence permanente dans l'atmosphère, et jusqu'à de grandes hauteurs ( $10^{\text{km}}$  et même  $40^{\text{km}}$ ), de poussières solides à un état extrême de division, semble prouvée <sup>(1)</sup>. A ces mêmes altitudes,

---

<sup>(1)</sup> A.-B. CHAUVÉAU, *La condensation de la vapeur d'eau par détente* (*Annuaire de la Soc. météor. de France*, septembre-octobre 1911, 34 pages).

l'air doit être ionisé par les radiations ultraviolettes de très courte longueur d'onde (rayons de Schumann); les récents travaux de C. Ramsauer <sup>(1)</sup>, en confirmant et complétant les résultats obtenus en 1900 par Lenard, ont en effet montré que ces radiations ionisent les gaz principaux de l'air. Les poussières doivent se charger par diffusion des ions, et constituer des germes de condensation pour la vapeur d'eau. Entraînés par le champ électrique de l'atmosphère, les germes positifs se dirigent vers la Terre. L'intervention des petits ions et des grandes décharges n'est donc pas nécessaire pour expliquer les pluies positives.

87. M. A. Baldit <sup>(2)</sup> a observé au Puy de Dôme que la buée qui s'élève le matin, sous l'action des rayons solaires, du sol humide ou recouvert de neige, est chargée négativement. « On saisit ainsi sur le fait, dit M. Brunhes, la fuite de l'électricité négative dont le sol est normalement chargé, entraînée par l'eau qui quitte le sol. » Ici un brouillard négatif, et non pas électriquement neutre, prend naissance sans qu'une sursaturation considérable soit nécessaire à sa formation. Ce brouillard peut, ultérieurement, donner une pluie négative.

88. Ainsi la première partie de la théorie Wilson-Gerdien est acceptable, mais elle ne s'impose pas *a priori*.

La seconde partie de cette théorie explique la formation des nuages négatifs et des nuages positifs, par l'intermédiaire des petits ions, grâce à des sursaturations supérieures ou égales respectivement à 4 ou à 6.

(1) C. RAMSAUER, *De l'influence sur les gaz de la lumière ultraviolette de très courte longueur d'onde* (Phys. Zeitsch., t. XII, 1911, p. 997).

(2) Cité par B. BRUNHES, *Études sur la déperdition de l'électricité en montagne* (Revue scientifique, 5<sup>e</sup> série, t. V, n<sup>o</sup> 11, 17 mars 1906, p. 326).

Ainsi que l'a remarqué C.-T.-R. Wilson lui-même, les faits expérimentaux manquent pour qu'on puisse se prononcer pour ou contre l'existence de telles sursaturations dans les régions élevées de l'atmosphère.

89. Une conséquence du mécanisme invoqué serait la prédominance, soit au point de vue de la fréquence, soit au point de vue de la charge par centimètre cube d'eau, des pluies négatives. Or « les mesures les plus récentes sous des climats très différents s'accordent pour reconnaître la prédominance des chutes et des apports positifs, aussi bien dans les pluies ordinaires que dans les pluies orageuses <sup>(1)</sup> ». Le rapport des fréquences des pluies positives et des pluies négatives serait, d'après Kaehler et Simpson, 2,5; d'après Baldit 1,52. Le rapport des quantités d'eau relatives aux pluies positives et aux pluies négatives serait d'après Baldit 1,45.

90. Une autre conséquence du mécanisme invoqué par la théorie de Wilson-Gerdien serait la production de pluies d'intensités bien supérieures à celles que l'on mesure le plus souvent.

Soient en effet  $T_1$  et  $T_2$  les températures absolues et  $v_1$ ,  $v_2$  les volumes d'une même masse de vapeur à l'origine et à la fin d'une détente adiabatique. On a,  $\gamma = 1,41$  désignant le rapport des chaleurs spécifiques de la masse gazeuse considérée,

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\gamma-1}.$$

Le poids (en grammes) de vapeur dont la tension est  $p$  (en millimètres de mercure) est, par mètre cube d'air,

$$1293 \times 0,623 \times \frac{p}{760} \times \frac{273}{T}$$

---

(1) A.-B. CHAUVEAU, *loc. cit.* au paragraphe 86.

ou

$$289,4 \frac{p}{T}.$$

Si  $p_1$  et  $p_2$  correspondent à  $T_1$  et  $T_2$ , le poids d'eau de condensation par mètre cube d'air est

$$\varpi = 289,4 \left( \frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right).$$

Soit  $v_1$ , en mètres par seconde, la vitesse du courant d'air ascendant entre les régions de l'atmosphère de températures  $T_1$  et  $T_2$ ; la hauteur de pluie, fournie par l'eau de condensation, est, en millimètres par minute,

$$\frac{\varpi(v \times 60) \times 10}{10000}$$

ou

$$17,4 \left( \frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right).$$

Aux degrés de détente  $\frac{p_2}{p_1}$ , respectivement égaux à 1,25 (ions négatifs) et 1,31 (ions positifs), correspondent des valeurs de  $\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1}$  respectivement égales à 0,913 et 0,884; et à ces mêmes degrés de détente, pour  $T_1 = 283$  ( $p_1 = 9,140$ ) correspondent pour  $T_2$  les valeurs 258,4 et 250,2, et pour  $p_2$  les valeurs 1,488 et 0,956. D'où les hauteurs de pluie indiquées ci-après :

| Vitesse<br>du courant<br>ascendant | Hauteurs de pluie.        |                           |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                                    | $\frac{p_2}{p_1} = 1,25.$ | $\frac{p_2}{p_1} = 1,31.$ |
| 1                                  | 0,45                      | 0,49                      |
| 4                                  | 1,80                      | 2,75                      |
| 8                                  | 3,62                      | 3,90                      |

On peut admettre l'existence *fréquente*, par régime cyclonique, de courants ascendants de 4<sup>m</sup> et même 5<sup>m</sup> par

seconde <sup>(1)</sup>; on devrait donc recueillir fréquemment des pluies donnant, même en faisant une large part à l'évaporation des gouttes pendant leur chute, plus de 1<sup>mm</sup> d'eau par minute. Or, dans nos climats, seules les grandes averses d'orage donnent *quelquefois* 1<sup>mm</sup> d'eau <sup>(2)</sup>. Les pluies d'origine cyclonique sont d'intensité bien moindre.

Si donc nous admettons, avec tous les météorologistes, que les pluies résultent surtout de condensations par détente <sup>(3)</sup>, nous ne pouvons admettre que ces détente, provoquées par les courants ascendants des régions centrales des dépressions, atteignent fréquemment les degrés 1,25 et 1,31, nécessaires pour que les petits ions de l'atmosphère constituent les noyaux des gouttelettes.

91. Les troubles blanchâtres, que l'on observe sur le bleu du ciel, sont l'indice de la condensation de la vapeur d'eau et de la formation d'un cumulus <sup>(4)</sup>. L'accroissement en nombre et l'agglomération en masses confuses des cumulus donnent les nimbus, masses épaisses, sombres, interceptant la lumière du jour; des nimbus tombe fréquemment de la pluie. Ces nuages s'étendent souvent en un voile uniforme, le pallio-nimbus, qui donne, généralement sur de grandes étendues de pays, des pluies ou des neiges de longue durée.

Nulle détente considérable ne préside à la formation ou à la succession de ces nuages. Selon la théorie de Wilson-Gerdien, ils ne devraient donner que des pluies électriquement neutres. L'expérience montre au contraire que

<sup>(1)</sup> J.-N. PLUMARDON, *Formation des principaux hydrométéores*, Paris, 1885.

<sup>(2)</sup> A. ANGOT, *Traité de Météorologie*, édition de 1899, p. 239.

<sup>(3)</sup> C'est la théorie fondée par James Hutton, *Ph. Trans. of the R. Soc. of Edinburg*, 1788.

<sup>(4)</sup> J. VINCENT, *Atlas des nuages* (*Service météor. de Belgique*, 1907).

le plus souvent ces pluies sont chargées, tantôt positives, tantôt négatives.

92. Les cumulus engendrent, par détente, les cumulo-nimbus, nuages qui donnent les pluies orageuses, les giboulées, les grésils, les grêles. Il résulte des mesures effectuées en Suède et aux États-Unis (1) que, en moyenne et en été, la base des cumulus est à l'altitude de  $1430^m$ , leur sommet à  $2100^m$ ; la base des cumulo-nimbus à  $1300^m$ , leur sommet à  $2670^m$ . La grandeur, suivant la verticale, des cumulus serait donc de  $670^m$ ; les cumulo-nimbus occuperaient  $1370^m$ . On peut donc évaluer à  $600^m$  ou  $700^m$  la dilatation suivant la verticale du nuage initial. D'où, pour les bords supérieurs des deux nuages successifs, une différence de température de  $3^{\circ}\text{C.}$  ou  $4^{\circ}\text{C.}$  (on compte en effet une variation de température de  $1^{\circ}$  pour une variation d'altitude de  $200^m$ ). La différence des températures moyennes de l'ensemble des deux espèces de nuages est donc certainement inférieure à  $4^{\circ}$ .

Il résulte de là que le degré de détente subi par le cumulus initial est bien inférieur à 1,25. En effet, nous avons précédemment calculé que, dans la région de l'atmosphère ici considérée, une détente adiabatique de grandeur 1,25 produirait un abaissement de température de  $25^{\circ}\text{C.}$  environ.

*Les détentees dont les cumulus sont le siège lors de leur transformation en cumulo-nimbus sont donc incapables de provoquer une condensation sur les petits ions entraînés par le courant d'air ascendant.* Si donc les cumulus étaient électriquement neutres, les cumulo-nimbus ne pourraient donner que des précipitations neutres. Nous savons, au contraire, que les pluies orageuses, la grêle, etc., sont le plus souvent chargées.

---

(1) A. ANCOT, *Ouvrage cité*, p. 207.

93. *En résumé* : La théorie de la condensation de la vapeur d'eau sur les petits ions de l'atmosphère peut rendre compte de la grandeur des charges transportées par la pluie, si l'ionisation et les détente dans l'atmosphère sont assez grandes ;

Cette théorie n'explique pas la prédominance des pluies positives ;

Elle n'explique pas pourquoi les précipitations fournies par les nimbus et par les cumulo-nimbus sont chargées ;

Les degrés de détente qu'elle invoque donneraient des intensités de pluie le plus souvent très supérieures à celles qu'on mesure ;

Ces grandes détente ne peuvent être supposées que dans la région des cirrus, et là leur intervention semble inutile pour expliquer la condensation de la vapeur d'eau.

#### IV.

##### Formation de nuages chargés.

94. Les condensations qui, au sein de l'atmosphère, donnent naissance aux cumulus (§ 91) doivent se produire sur les poussières et les gros ions. Dès leur formation, les gouttelettes sont sollicitées par la pesanteur et par le champ électrique terrestre. Ainsi peut s'opérer une séparation lente des gouttelettes positives et des gouttelettes négatives, les premières s'accumulant vers la base inférieure du nuage en formation, les secondes vers la base supérieure.

Au cours de leur accroissement par condensation de la vapeur d'eau, les gouttelettes sont soumises à des phénomènes de coalescence ; elles s'enrichissent aussi en petits ions qu'elles empruntent à l'air voisin. Dans la mesure où les résultats des observations de Millikan sont applicables à l'atmosphère, il est permis de supposer que la masse nuageuse, dans son état d'équilibre final, est con-

stituée par des gouttelettes de grosseurs différentes, et dont la charge électrique est sensiblement proportionnelle à la masse mécanique. Avec la même restriction, les expériences précédemment rappelées (§ 84) de H.-A. Wilson autorisent à distinguer dans cette masse nuageuse plusieurs nuages, chacun d'eux sensiblement homogène.

La présence de nuages homogènes quant à la grosseur des gouttelettes qui les constituent, nous est révélée par l'étude des phénomènes optiques de l'atmosphère. D'après Kaëmtz <sup>(1)</sup>, les mesures du premier anneau rouge des couronnes lunaires correspondent à des gouttelettes de  $64^{\mu}$  à  $16^{\mu}$ . Mascart <sup>(2)</sup> a mesuré sur le Pilate le premier anneau rouge des couronnes antisolaires, et a assigné aux gouttelettes des diamètres de  $11^{\mu}$  à  $6^{\mu},4$ .

Nous ne savons d'ailleurs rien sur la charge électrique des gouttelettes qui constituent ces nuages.

95. Notre hypothèse sur la formation de nuages chargés, grâce à une sorte de filtration des gouttelettes initiales sous l'action combinée de la pesanteur et du champ électrique terrestre, expliquerait les décharges électriques qui s'observent *fréquemment* au sein même d'un nuage orageux. Ces décharges résulteraient de l'accumulation des électricités de signes contraires à la base et au sommet du nuage. La présence de gouttelettes intermédiaires et chargées faciliterait le passage de la foudre.

Une expérience très simple permet de vérifier ce dernier point :

Deux disques en cuivre, A et B, vernis à la gomme laque, d'un diamètre de  $20^{\text{cm}}$  environ, isolés par des manches en verre, et écartés de  $15^{\text{cm}}$ , sont réunis aux armatures

---

(1) KAEMTZ, *Cours de Météorologie*, traduction française par Ch. Martins, Paris, 1843, p. 424.

(2) MASCART, *Traité d'Optique*, t. II, 2<sup>e</sup> fascicule, Paris, 1893, p. 408.

d'une machine de Wimshurst. Les boules terminales *a* et *b* des armatures sont écartées de 12<sup>cm</sup>.

La machine à influence est conduite par un moteur ali-

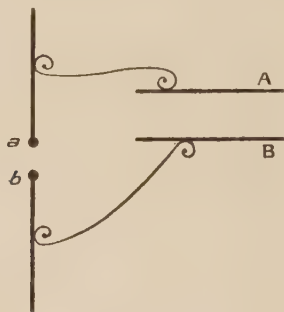


Fig. 22.

menté par une batterie d'accumulateurs. L'étincelle jaillit régulièrement entre les boules *a* et *b*.

Aussitôt, qu'au moyen d'un pulvérisateur, on injecte entre les plateaux des gouttelettes d'eau distillée, l'étincelle cesse de jaillir en *a*, *b*, pour éclater en A, B. Lorsque aucune gouttelette n'est plus visible entre les plateaux, l'étincelle cesse de jaillir entre eux, pour éclater de nouveau en *a*.

Dans les mêmes conditions expérimentales, un jet d'air ne provoque pas le passage de l'étincelle en AB.

96. Nous avons rappelé précédemment (87) les observations de brouillards négatifs faites par M. Baldit au Puy de Dôme. Ces observations, effectuées avec l'appareil de déperdition d'Elster et Geitel, complètent les déductions que M. Chauveau a tirées de mesures du champ électrique dans des circonstances atmosphériques comparables.

« Les brumes qui s'élèvent du sol <sup>(1)</sup> en séjournant dans

---

(1) A.-B. CHAUCHEAU, *Introduction historique*, etc., p. 13.

son voisinage, telles qu'on les observe fréquemment en automne et dans les premiers jours de l'hiver, sont généralement négatives. Elles déterminent un abaissement du potentiel, accompagné de variations brusques et de changements de signe analogues aux effets de la pluie, et qu'on constate parfois, avec surprise, sur le tracé de l'enregistreur, après des nuits de ciel clair et sans nuage. »

L'effet constaté correspond exactement à celui que donnerait un brouillard primitivement neutre, formé au voisinage du sol, et qui, en s'élevant, perdrait ses gouttelettes positives entraînées vers le sol par l'action combinée de la pesanteur et du champ électrique de l'atmosphère.

97. Le mécanisme que nous avons invoqué ci-dessus n'est qu'une adaptation aux faits récemment révélés par les expériences sur les brouillards artificiels, d'une idée très ancienne, développée par M. Pellat <sup>(1)</sup> pour expliquer la foudre, et suivant laquelle les nuages *semi-conducteurs* seraient électrisés par influence dans le champ terrestre, et séparés par les vents en nuages positifs et négatifs capables de présenter des différences de potentiel considérables.

## V.

### Rôle des radiations ultraviolettes.

98. Lenard et Wolf <sup>(2)</sup> montrèrent en 1899 que la lumière ultraviolette produit des noyaux de condensation dans un récipient renfermant de l'air humide. Ils attribuèrent la production de ces noyaux à la désagrégation de la face intérieure de la fenêtre en quartz traversée par la lumière.

(1) H. PELLAT, *Leçons sur l'électricité*, Paris, Georges Carré, 1890.

(2) LENARD et WOLF, *Wied. Ann.*, t. XXXVII, 1899, p. 443.

C.-T.-R. Wilson montra que la lumière ultraviolette produit dans l'air, saturé ou non de vapeur d'eau, des noyaux de condensation.

La nature chimique de ces noyaux et le mécanisme de leur formation ont été l'objet de longues discussions, mais leur existence n'est pas douteuse.

Aitken n'avait pas réussi à manifester par les rayons solaires les effets photo-électriques obtenus par des sources artificielles. Wilson ne réussit pas davantage; il attribua l'insuccès de ses tentatives, non pas à l'absence de noyaux, mais à leur diffusion rapide vers les parois des récipients; et il fait remarquer dans son Mémoire <sup>(1)</sup> que dans les hautes régions de l'atmosphère les noyaux produits doivent persister presque indéfiniment, et devenir assez gros pour agir, au point de vue de la condensation, comme des particules de poussières.

99. On est aujourd'hui bien certain que les radiations solaires ultraviolettes de longueur d'onde supérieure à 1000 angströms peuvent parvenir jusqu'au sol <sup>(2)</sup>, et donner lieu à la surface de la Terre à des phénomènes chimiques, biologiques <sup>(3)</sup> et photo-électriques. D'après M. E. Bloch <sup>(4)</sup>, qui rappelle l'opinion contraire de MM. Bichat et Blondlot et de J.-J. Thomson, l'eau pure et les solutions salines présentent presque toujours un effet photo-électrique notable. M. Bloch étend même les résultats de ses expériences à l'action des radiations solaires sur les mers, les rivières et les surfaces solides de la Terre,

---

<sup>(1)</sup> Mémoire précité de 1899 (*Roy. Soc.*), p. 431.

<sup>(2)</sup> H. BUISSON et Ch. FABRY, *Revue générale des Sciences*, 30 avril 1911.

<sup>(3)</sup> Daniel BERTHELOT, *Revue scientifique*, 23 mars 1912.

<sup>(4)</sup> E. BLOCH, *Rôle des impuretés dans l'effet photo-électrique sur l'eau et les solutions salines* (*Le Radium*, t. XIX).

et il attribue à l'effet photo-électrique, pour une part de  $\frac{1}{10}$  environ, l'ionisation de l'atmosphère <sup>(1)</sup>.

On est certain aussi <sup>(2)</sup> que la limite du spectre solaire s'avance vers les petites longueurs d'onde à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère.

100. Nous avons constaté nous-même une action photo-électrique des radiations ultraviolettes émises par une lampe à vapeurs de mercure sur les gouttelettes produites par une cascade d'eau distillée.

Nous devons donc envisager comme certaine une action photo-électrique des rayons solaires sur les gouttelettes des nuages.

L'analyse comparative des eaux météoriques et de la rosée nous donne une preuve indirecte de l'existence de cette action : on ne trouve pas d'eau oxygénée dans la rosée; on en trouve dans la pluie et dans la neige, et en quantité plus grande dans les précipitations de jour que dans les précipitations de nuit <sup>(3)</sup>.

La lumière ultraviolette tendant à provoquer l'émission d'électrons par les corps qu'elle éclaire, à la périphérie des nuages éclairés les gouttelettes neutres se chargeront positivement, les gouttelettes négatives perdront leur charge, les gouttelettes positives resteront positives. Au total, les gouttelettes positives seront en excès.

Ainsi s'explique la prédominance des pluies positives.

101. « La brume haute d'hiver, dit M. Chauveau, au travers de laquelle, par de belles journées de ciel sans nuages, le Soleil perce à peine et paraît d'un rouge foncé, donne lieu, presque toujours, à une augmentation du champ. »

<sup>(1)</sup> E. BLOCH, *L'ionisation de l'eau par la lumière ultraviolette* (*Le Radium*, t. V, 1908, p. 240).

<sup>(2)</sup> H. BUISSON et Ch. FABRY, *Mémoire précité*.

<sup>(3)</sup> SCHÖNE, *Berichte*: 1874, p. 1693; 1877, p. 482, 561, 574 et 1028.

Les belles journées de ciel sans nuage sont favorables à l'accroissement de l'effet photo-électrique solaire, et le phénomène des brumes hautes positives, qui correspond à des faits « fréquemment et nettement observés », s'explique immédiatement par les considérations que nous avons développées.

102. Les électrons, libérés dans l'atmosphère par les effets photo-électriques, donnent des ions positifs qui n'apportent qu'une perturbation passagère dans l'équilibre statistique entre petits ions, gros ions et molécules neutres.

103. Pour expliquer la prédominance des pluies positives, nous n'avons eu qu'à appliquer aux gouttelettes des nuages la théorie de M. Brillouin <sup>(1)</sup> relative à l'action des radiations ultraviolettes sur les aiguilles de glace des cirrus.

## VI.

### Résumé.

#### 104. *En résumé :*

La pulvérisation normale des gouttes de pluie dans l'atmosphère n'explique pas les charges observées par centimètre cube d'eau précipitée;

La théorie de Wilson-Gerdien doit être rejetée comme conduisant à des conclusions contraires aux faits observés;

Les charges de la pluie peuvent être considérées comme ayant leur origine dans les gros ions et les poussières chargées;

La prédominance des pluies positives doit être envisagée comme une conséquence de l'action photo-électrique des radiations solaires ultraviolettes.

---

<sup>(1)</sup> M. BRILLOUIN, *Origine, variations et perturbations de l'électricité atmosphérique* (*J. de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. IX, 1890, p. 91).

## EFFETS DE L'ÉCRASEMENT DES GOUTTES DE PLUIE SUR LE SOL.

105. Ph. Lenard a calculé, comme conséquence de ses expériences sur les chutes d'eau, qu'une pluie d'intensité moyenne tombant sur le sol lui communique au bout d'un certain temps une charge suffisante pour annuler sa charge normalement négative et provoquer l'inversion du champ électrique de l'atmosphère. Ce calcul a été fait en 1892, à une époque où l'existence des ions dans les gaz était tout au plus soupçonnée et où les propriétés de ces ions (mobilité, recombinaison, diffusion) n'étaient pas connues.

Nous nous sommes borné à vérifier (n° 33) l'existence du phénomène des cascades dans le cas d'une chute d'eau distillée sur les principaux obstacles répandus à la surface du sol (terre, bois, feuilles de végétaux, etc.).

Il ne serait peut-être pas impossible d'aborder par le calcul le problème de la variation du champ de l'atmosphère en évaluant la différence de potentiel entre un point d'altitude invariable et le sol. Toutefois, pour poser le problème même dans sa plus grande simplicité, de nombreuses hypothèses seraient nécessaires : il faudrait imaginer une distribution initiale simple (uniforme ou suivant une loi exponentielle, par exemple) des ions dans l'atmosphère; supposer à ces ions une mobilité moyenne; se donner la charge vraie de la Terre; supposer une pluie non chargée, d'intensité constante, agissant comme une source constante d'ions négatifs, de mobilité connue, à la surface du sol; se donner enfin les coefficients de recombinaison des ions. On aurait alors les éléments nécessaires pour calculer, dans un champ à chaque instant variable, la densité cubique  $\rho$  au point d'altitude choisie.

En supposant, le champ  $h$  dirigé suivant la verticale  $z$ , l'équation de Poisson

$$\frac{\partial h}{\partial z} = -4\pi\rho$$

permettrait de connaître l'époque à laquelle se produit l'inversion du champ.

De pareils calculs sont au moins difficiles, et certainement inutiles pour interpréter les faits.

L'observation directe des phénomènes de l'électricité atmosphérique nous a montré, par temps de pluie, des variations du champ quelquefois très fréquentes et absolument désordonnées; ces brusques changements précèdent souvent l'arrivée de la pluie sur le sol; la conductibilité de ce dernier, variable avec sa constitution géologique et avec son état d'humidité, joue vraisemblablement un grand rôle dans le phénomène de l'inversion du champ, qui peut être considérée *a priori* comme n'obéissant à aucune loi susceptible d'être traduite par une équation simple.

Nous estimons que les déplacements désordonnés, par temps de pluie, de grandes masses d'air chargées d'ions et de nuages pluvieux formés de gouttelettes chargées, et la variabilité de la conductibilité du sol là où il pleut rendent illusoire toute tentative de calcul qui viserait l'interprétation des faits observés.

---

## CONCLUSIONS.

106. A la faveur de la simplicité du phénomène présenté par les cascades d'eau distillée, qui n'engendrent sur l'air que des charges d'un seul signe, nous avons cherché à mettre en évidence le rôle particulier des divers facteurs de l'électrisation. Ces expériences, faites en utilisant un cylindre de Faraday, nous ont permis de vérifier ou de démontrer les faits suivants :

La grandeur des charges mesurées croît avec la hauteur de chute et avec la grosseur des gouttes (Ph. Lenard); la variation des charges est plus rapide que la variation de la force vive des gouttes au moment de leur écrasement;

Le siège des phénomènes d'électrisation est le pied même de la cascade (Ph. Lenard);

La nature du métal employé comme obstacle d'écrasement est sans influence sur la grandeur des charges mesurées (J.-J. Thomson);

La conductibilité de l'obstacle, lorsqu'il n'est pas métallique, est un facteur important du phénomène;

Un accroissement de la température du liquide provoque un accroissement des charges recueillies (J.-J. Thomson);

L'éclairement, par la lumière ultraviolette, des gouttelettes provenant de la pulvérisation de la goutte initiale a pour effet d'accroître la charge observée;

La grandeur des charges recueillies est de l'ordre de  $10^{-2}$  U. E. S. par  $\text{cm}^3$  d'eau distillée (Ph. Lenard);

La mobilité globale des charges entraînées par le courant d'air est de l'ordre de  $10^{-2}$  cm : sec dans un champ de 1 v : cm.

Une partie au moins de ces charges a pour support matériel des gouttelettes d'eau.

107. Ces faits nous ont permis d'interpréter les résultats

de recherches anciennes sur l'électrisation de l'air, recherches dont l'idée première est due à Lord Kelvin.

Ils nous ont permis de montrer l'incorrection de nombreuses expériences sur le transport de charges par l'évaporation des liquides.

Nous avons vérifié que la simple déformation d'une surface liquide en contact avec l'air était inefficace pour libérer des charges sur l'air (E. Salles, L. Bloch).

108. En employant un condensateur à gros ions, nous avons montré :

Que les courants de saturation fournis par diverses solutions salines aqueuses présentent la même allure générale de variation en fonction de la concentration de ces solutions ;

Que les liquides les plus actifs sont en général les liquides ionisants au point de vue électrolytique ;

Que les ions portés normalement par l'air diminuent l'intensité des phénomènes observés.

109. A l'appui de l'analogie déjà indiquée (J.-J. Thomson, de Broglie, L. Bloch) entre les phénomènes d'ionisation par cascade, par barbotage et par pulvérisation, nous avons apporté quelques arguments nouveaux ; et nous avons essayé de montrer que, en général, l'activité des liquides soumis à ces trois genres d'expérimentation est liée à l'intensité de la pulvérisation proprement dite qu'ils subissent.

110. Nous avons indiqué qu'il nous paraît actuellement impossible d'évaluer la part qui revient à l'écrasement contre le sol des gouttes de pluie dans les phénomènes de l'électricité atmosphérique ; nous avons été ainsi conduit à étudier les charges transportées par les pluies, à attribuer aux gros ions de l'atmosphère un rôle

prépondérant dans l'origine de ces charges, et à attribuer aux radiations solaires ultraviolettes la cause de la prédominance des précipitations positives.

Nous ne saurions terminer ce Mémoire sans exprimer à M. Langevin notre vive reconnaissance pour l'hospitalité particulièrement agréable qu'il nous a donnée au Collège de France; et sans adresser nos plus sincères remerciements à M. A.-B. Chauveau qui guida nos premiers pas, il y a déjà quelques années, dans nos recherches sur l'électricité atmosphérique.

*Vu et approuvé :*

Paris, le 8 mai 1912.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,  
PAUL APPELL.

*Vu et permis d'imprimer :*

Paris, le 8 mai 1912.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,  
L. LIARD.





## TABLE DES MATIÈRES.

|                                                                          | Pages |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|
| INTRODUCTION .....                                                       | 1     |
| HISTORIQUE. — Faits les plus anciens .....                               | 2     |
| Faits postérieurs à l'hypothèse de la couche double de<br>Helmholtz..... | 8     |
| Faits postérieurs à la découverte de l'ionisation des gaz....            | 13    |
| <br>CHAP. I. — <i>Étude des charges totales</i> .....                    | 17    |
| Dispositif expérimental.....                                             | 17    |
| Eau distillée .....                                                      | 21    |
| Influence de divers facteurs physiques du phénomène.                     | 21    |
| Grandeur des charges. Ionisation maxima.....                             | 28    |
| Mobilité globale des ions.....                                           | 30    |
| Interprétation de quelques expériences anciennes.....                    | 32    |
| Solutions aqueuses.....                                                  | 33    |
| Influence de la température.....                                         | 36    |
| Rôle des gouttelettes engendrées par la cascade.....                     | 40    |
| Influence de la lumière ultraviolette.....                               | 41    |
| Phénomènes secondaires.....                                              | 42    |
| <br>CHAP. II. — <i>Étude des charges corpusculaires</i> .....            | 45    |
| Dispositif expérimental.....                                             | 45    |
| Eau distillée.....                                                       | 48    |
| Solutions aqueuses.....                                                  | 50    |
| Liquides divers.....                                                     | 57    |
| Influence des ions portés par l'air.....                                 | 60    |
| <br>CHAP. III. — <i>Interprétation des faits observés</i> .....          | 63    |
| Analogies de phénomènes.....                                             | 63    |
| Sur les théories de l'ionisation par pulvérisation.....                  | 66    |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CHAP. IV. — <i>Déformation des surfaces liquides. Évaporation...</i>                       | 67 |
| Déformation des surfaces liquides.....                                                     | 67 |
| Évaporation des liquides non électrisés.....                                               | 70 |
| Évaporation des liquides électrisés.....                                                   | 70 |
| CHAP. V. — <i>Sur les phénomènes électriques qui accompagnent la pluie .....</i>           | 71 |
| Origine des charges transportées par la pluie.....                                         | 71 |
| I. Grandeur des charges.....                                                               | 71 |
| II. Sur la théorie de la pulvérisation des gouttes de pluie..                              | 72 |
| III. Sur la théorie de Wilson-Gerdien.....                                                 | 75 |
| Brouillards artificiels formés par détente de l'air humide en présence de petits ions..... | 77 |
| Expériences de Millikan.....                                                               | 78 |
| Critique de la théorie Wilson-Gerdien.....                                                 | 82 |
| Résumé.....                                                                                | 88 |
| IV. Formation de nuages chargés.....                                                       | 88 |
| V. Rôle des radiations ultraviolettes.....                                                 | 91 |
| VI. Résumé.....                                                                            | 94 |
| Effets de l'écrasement des gouttes de pluie sur le sol.....                                | 95 |
| CONCLUSIONS.....                                                                           | 97 |



---

---

## SECONDE THÈSE.

---

### PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

---

Tension de polarisation des métaux. (Série des tensions, applications.)

*Vu et approuvé :*

Paris, le 8 mai 1912.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

PAUL APPELL.

*Vu et permis d'imprimer :*

Paris, le 8 mai 1912.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

L. LIARD.





---

49648 PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS.  
Quai des Grands-Augustins, 55.

---